

永久磁石の運動制御を用いた 2 自由度磁気浮上装置の開発

高知工科大学大学院

工学研究科基盤工学専攻

知能機械コース 1055060

政木 慶次

目次

1. 緒言
 - 1.1 要旨
 - 1.2 研究背景

2. 研究内容
 - 2.1 磁気浮上システムの目的
 - 2.2 浮上原理

3. 磁力に対する検討
 - 3.1 磁力とその特徴
 - 3.2 1自由度浮上機構

4. 2自由度浮上機構
 - 4.1 アクチュエータを2つ配置した2自由度浮上装置
 - 4.2 浮上システムのモデル化
 - 4.3 浮上系の運動方程式
 - 4.4 制御システム
 - 4.5 状態方程式
 - 4.6 線形性を考えた場合のフィードバックゲイン

- 4.7 数値シミュレーション
- 4.8 磁場解析
- 4.9 磁力の測定
- 4.10 アクチュエータ2つ配置による浮上実験
- 4.11 アクチュエータを3つ配置した2自由度浮上装置
- 4.12 モデル化
- 4.13 磁場解析

5. 実験と考察

- 5.1 浮上実験
- 5.2 周波数応答
- 5.3 ステップ応答
- 5.4 考察

6. 結言

- 6.1 謝辞
- 6.2 参考文献

1.緒言

1.1 要旨

永久磁石をアクチュエータで制御することにより，強磁性体の非接触浮上が可能である [1] . この浮上機構を応用して種々の 1 自由度浮上システムが提案されている [2][3][4]. また，この浮上方式は永久磁石を用いるのでコイルの体積が不要であることや永久磁石の駆動機構を浮上体周辺に配置する必要がないことなどの特徴を持つため，微小物体の非接触把持に有効に利用することが考えられる．非接触把持を考えた場合，横方向の安定性，対象物の形状への対応，操り動作などの点から現在提案されている 1 自由度浮上システムでは不十分であり，2 自由度，3 自由度の浮上機構を考える必要がある．このように多自由度にした場合，永久磁石を用いた浮上方式では磁路が閉じるようになっていないこと，浮上体の大きさに対して空隙が比較的長いことなどを考慮する必要があり，ラジアル形の磁気軸受けのように各支持力を独立に考えることができない可能性がある．

以上より,本研究では上述の問題を解決できる多自由度の非接触把持システムを実現するためのステップとして 2 自由度磁気浮上システムを提案しこれを開発した.

1.2 研究背景

近年,精密機械やナノテクノロジーの進歩によりあらゆる機械パーツの微細化が進んでいる． よって従来は機械パーツの精度を保ち、塵埃の発生を抑えるためにロボットハンドによる製品の組み立てまたは搬送が行われている． しかし,更なる機械部品の微細化が進めばロボットアームによる組み立て,搬送は対応仕切れない可能性がある．

非接触ハンドリングシステムを用いれば塵埃の低減,ロボットアームに起因するパーツ

の変形を抑えることが可能であると考えられる。非接触ハンドリングシステムには空気圧、静電気、磁力を用いる場合が多い、下記にそれぞれの特徴を示す。空気圧を用いた場合、吸引力はある程度出すことができ、浮上対象の材質の制限は少ないと考えられるがエアを使うため塵や埃の発生が考えられ塵埃の低減を考えるとこの方式は不向きである。静電気力を用いた場合、浮上対象が絶縁体でなければよいが他のシステムと比べ格段に吸引力が小さく、面積が広くかつ薄いものに浮上対象が制限される。磁力を用いた場合、浮上対象は磁性体に限られるがならないが磁性体であれば他のシステムに比べ吸引力は大きい。よって本研究では浮上対象物に制限があるものの塵埃の低減、パーツの精度維持、浮上対象の形状を考慮し磁気浮上システムを用いることで上記の諸問題を解決できると考えた。

2.研究内容の説明

2.1 磁気浮上システムの目的

本研究では製作した 2 自由度磁気浮上装置を用いて直径 25mm,質量 63.5×10^{-3} kgの鉄球を浮上体とし, これを最適フィードバック制御理論に基づきフィードバックゲインを求め P D 制御を用いて非接触把持を実現する. また浮上させた状態で水平方向に ± 5 mm の範囲で任意の位置制御を実現させることを目的とし, 浮上機構の周波数応答とステップ応答を取り制御システムの安定性を確認する.

2.2 浮上原理

この浮上原理は, 永久磁石と浮上体の空隙を調整することにより,その空隙に働く支持力を制御して非接触浮上を行わせるものである. Fig2.1 に示すように永久磁石と浮上対象物の空隙が狭くなると支持力は大きくなり磁石に引き寄せられる.逆に空隙が広くなれば支持力は小さくなり重力が支持力を超え浮上対象物は落下してしまう. よってアクチュエータを用いて磁石位置を制御してやることで空隙を調整し重力と支持力のバランスを取る.これを連続的に繰り返すことで浮上を実現させるものである.

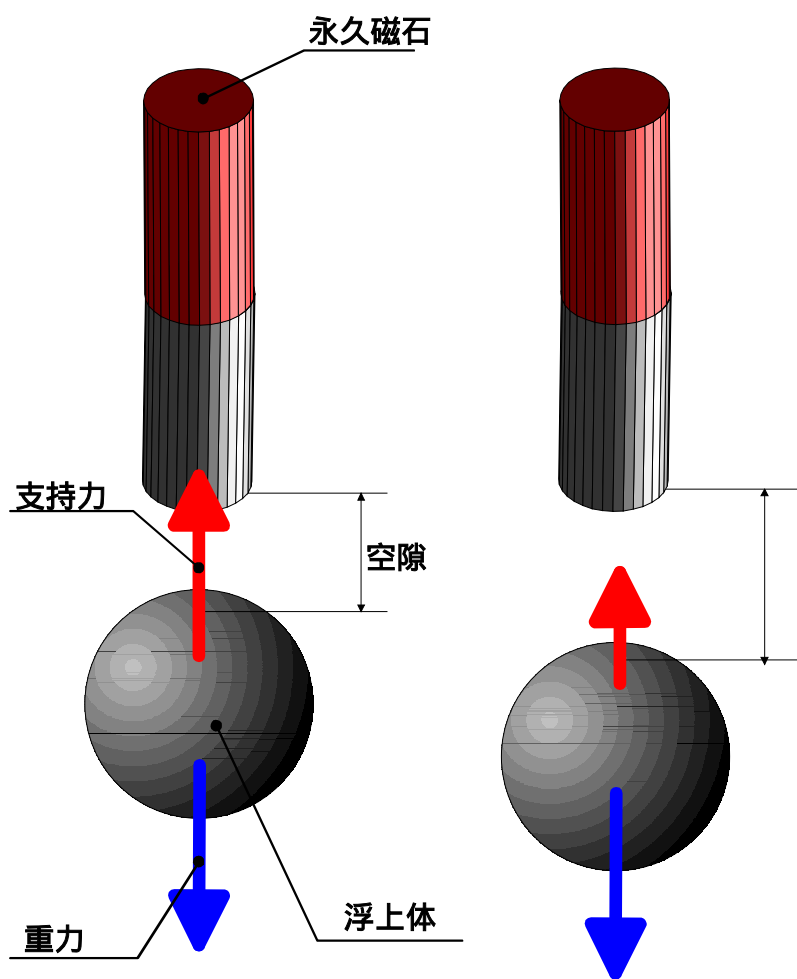


Fig.2.1

3.磁力に対する検討

3.1 磁力とその特徴

永久磁石と浮上体の吸引力の大きさを Fig3.1 のような測定装置を製作し測定を行った。計測には 5 kg *f* まで測定可能な Load Cell を用い,実験で使用する永久磁石である 8mm × 8 mm の円柱型のネオジ磁石を用い,同じく浮上実験で浮上体として用いる質量 63.5×10^{-3} (kg)の鉄球を使用した。

計測方法は鉄球に Load Cell を取り付けその際,磁石が鉄球に及ぼす磁力を鉄球表面と永久磁石表面までの空隙を 0.5mm ~ 15mm まで 0.5mm 間隔ずつ計測した.その結果を Fig3.2 に示す.これより浮上体と鉄球のあいだに働く支持力は次のように空隙の二乗に反比例すると仮定する。

$$\text{吸引力} = \frac{K}{\text{空隙}^2} \quad (3.1)$$

ここで *K* は磁石定数とする。

また今回実験に用いる磁石は浮上体を浮上させるのに十分な支持力を出せることがわかった。

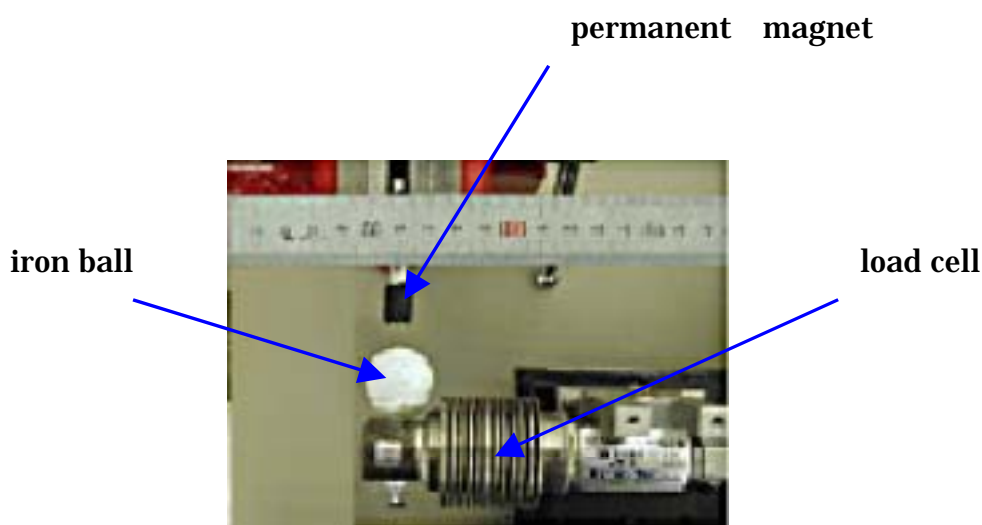


Fig.3.1 Photograph of experimental set up

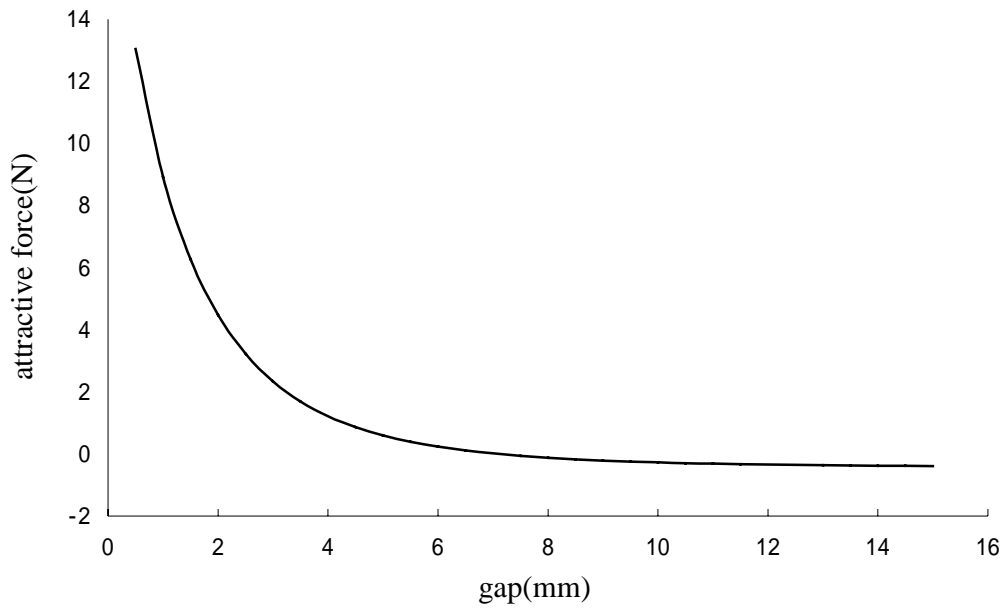


Fig.3.2 attractive force about the air gap between the magnet and the iron ball

3.2 1 自由度浮上機構

前述の計測結果を用い浮上機構の理論的な検証を行うために1自由度浮上機構のモデル化を行う。Fig3.3 に示した浮上機構について理論的な検証を行う。以下に記号を示す。

Z_0 : 浮上体位置

Z_1 : 永久磁石位置

m_0 : 浮上体質量

m_1 : 永久磁石質量

f_{a1} : 磁石の駆動力

f_{a1} : 磁石が浮上体に及ぼす鉛直方向の支持力

d : 永久磁石と浮上体までの距離

K : 磁石の係数

k_m : 線形化したときの永久磁石の吸引力定数

k_1 : 永久磁石支持部のばね定数

c_1 : 永久磁石の減衰係数

g : 重力加速度

F_{z_0} : 平衡状態を実現するための力

また, 平衡位置からの微小偏差は z_1 をつけて表すものとする.

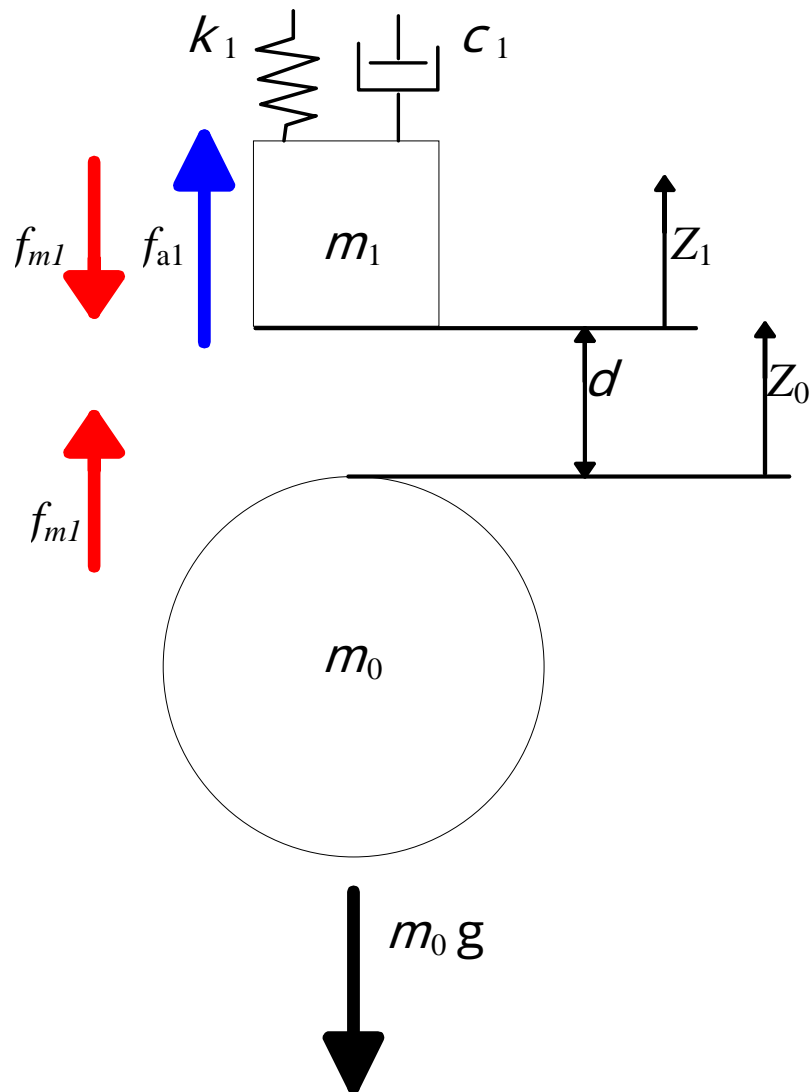


Fig. 3.3 Model of 1d.o.f magnetic suspension system

1 自由度浮上実験のために，浮上体と永久磁石の間に働く吸引力について考察する．前章で述べたように吸引力は永久磁石と浮上体の空隙の二乗に反比例する．よって Fig3.3 の永久磁石と浮上体の間に働く支持力は，

$$f_{m1} = \frac{K}{d^2} \quad (3.2)$$

ここで

$$d = z_1 - z_0$$

である．空気などの粘性摩擦の影響を無視すると，Fig3.3 における永久磁石と浮上体の運動方程式は

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 \dot{z}_1 + k z_1 = f_{a1} - f_{m1} - m_1 g \quad (3.3)$$

$$m_0 \ddot{z}_0 = f_{m1} - m_0 g \quad (3.4)$$

このシステムでは，駆動力が一定では安定な浮上は行われなためフィードバック制御が必要である．浮上システムを安定化するための制御は浮上体に基づき k_p , k_d をゲインとして次の制御則に従うものとする．

$$f_{a1} = k_p z + k_d \dot{z} + F_{z0} \quad (3.5)$$

システムの入力は永久磁石の位置となるので，運動方程式は平衡点近傍での浮上体についてのみ考えればよいので (3.4) 式を線形化すると次式となる

$$m_0 \ddot{z}_0 = -K_m \Delta f_m = k_m (\Delta z_0 - \Delta z_1) \quad (3.6)$$

状態ベクトルを

$$x = \begin{bmatrix} \Delta z_0 \\ \dot{\Delta z}_0 \\ \Delta z_1 \\ \dot{\Delta z}_1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

浮上システムの入力 u を f_{a1} とし，出力 y を浮上体位置 z_0 とすると

$$\dot{x} = A_1 x + b_1 u \quad (3.8)$$

実験装置を Fig.3.4 に示す .浮上体の位置検出は Fig.3.4 に示すように 2 自由度の位置検出が可能な光学式センサを使用するが 1 軸の浮上実験では鉛直方向の位置情報のみを用いる . コントローラは DSP を用いる .

まず ,本実験において用いる浮上体重量 ,永久磁石部重量はそれぞれ $m_0 g = 0.624\text{N}$, $m_1 g = 3.675\text{N}$ であり, また Fig. 3.2 より $d_0=48\text{mm}$ と求めることができた .

以上より最適フィードバック理論に基づきフィードバックゲインを求めた . そして浮上実験を行い、これに成功した.浮上時の写真を Fig. 9 に示す . そのときの磁石と浮上体の変位をともに Fig. 10 に示す .これはステップ状の外乱として浮上体のセンサ出力に 0.05mm を与えたときの収束の状態である.外乱を与えた後 ,浮上体には振動が見られるがその後収束している . しかし , その後も 0.1mm 程度の残留振動が見られる . これは VCM 内にあるベアリングの非線形摩擦の影響であると考えられる .



Fig3.5 Photograph during suspension

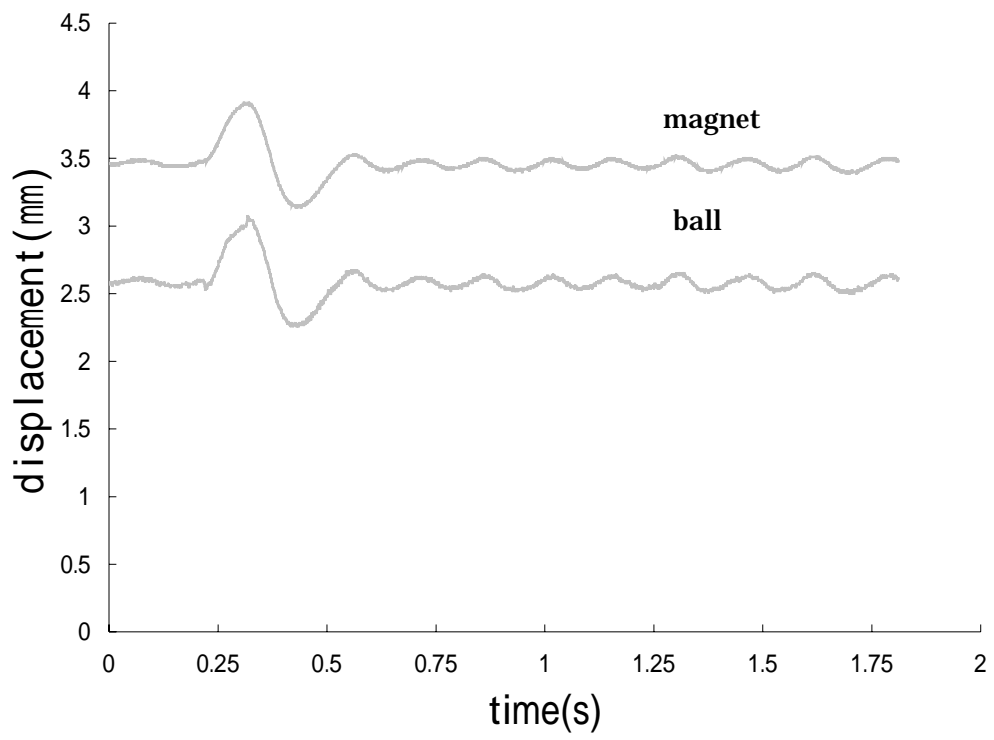


Fig.3.6 Experimental result of step response

4.2 自由度浮上機構

4.1 アクチュエータを2つ配置した2自由度浮上装置

試作した2自由度浮上装置の写真を Fig.4.1 に示す。2つのボイスコイルモータ形のアクチュエータを持ち、それぞれが永久磁石を駆動するようになっている。アクチュエータは鉛直に立てられた半円形のレールに取付けるようになっており、その取付け位置によって永久磁石の駆動方向を調整可能である。浮上体は鉄球であり、それを2つの永久磁石でひっぱりあげるような形式となっている。すなわち、永久磁石は、鉄球を中心とした半径方向にアクチュエータによって駆動される。永久磁石の動き、および浮上体の動きはセンサによって検出可能である。

Fig.4.1 に示されるような2自由度浮上システムを考察するための概略図を Fig.4.2 に示す。Fig.4.2 には、2自由度および1自由度浮上装置の概略を示してある。2自由度浮上装置では、 o が原点であり、 (x, y) で示される球形のものが浮上体である。浮上体は重力の影響を鉛直下向きに受ける。 X 軸、 Y 軸にある長方形のものは永久磁石を表しており、それぞれの軸上を可動であるものとする。両軸は鉛直方向から $1/4$ だけ傾いているものと考ええる。浮上体に働く永久磁石の吸引力は、浮上体の中心位置と永久磁石の先端の間に働くものとし、その強さは前章と同じく浮上体と永久磁石先端の距離の二乗に反比例するものとする。浮上体の大きさは無視できるものとし、永久磁石の横方向のポテンシャル力は上記の吸引力の横方向成分と一致するものとする。

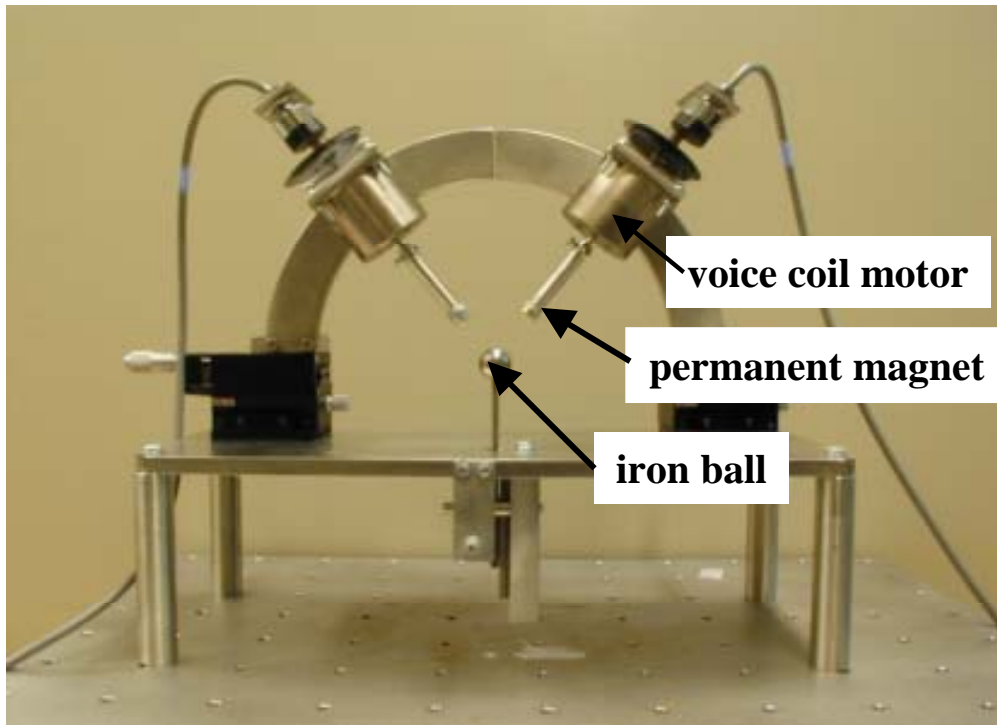


Fig.4.1 Photograph of experimental setup

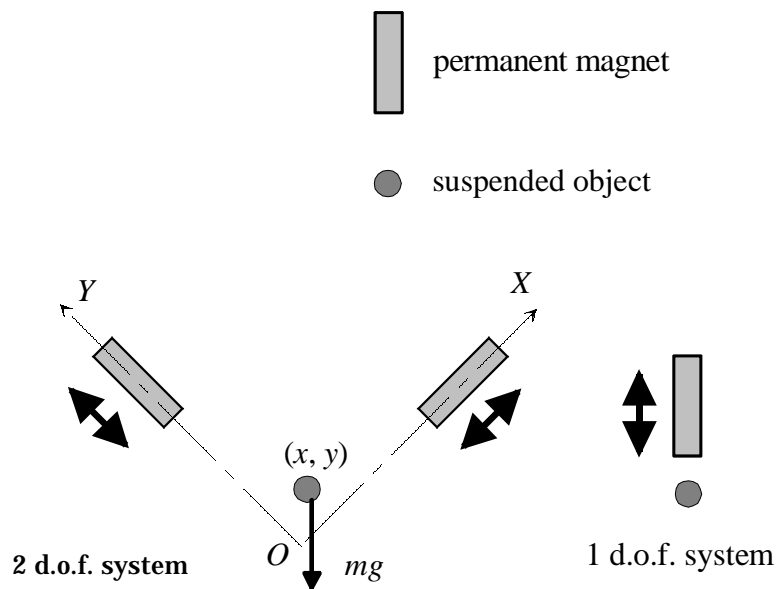


Fig.4.2 Outline of two types of suspension system

4.2 浮上システムのモデル化

4.1 で述べた 2 自由度浮上システムは，以下のようにモデル化することができる．記号を以下に示す．

x, y : 浮上体位置

m : 浮上体質量

x_m : X 軸上の磁石の先端位置

y_m : Y 軸上の磁石の先端位置

m_m : 磁石質量

f_{xx}, f_{xy} : X 軸上の磁石が浮上体におよぼす吸引力，
2 つ目の添字がその方向

f_{yx}, f_{yy} : Y 軸上の磁石が浮上体におよぼす吸引力

k : 磁石の定数

l_x, l_y : それぞれの軸の磁石と浮上体との距離

k_p : 比例フィードバックゲイン

k_d : 微分フィードバックゲイン

x_{m0}, y_{m0} : 平衡状態を実現するための位置

k_e : 力制御の場合の磁石を支持するばね定数

k_b : 力制御の場合の磁石支持部の減衰係数

F_x, F_y : 力制御の場合の各磁石に対する駆動力

l_0 : 平衡位置にあるときの空隙距離

F_{x0}, F_{y0} : 平衡状態を実現するための力

g : 重力加速度

4.3 浮上系の運動方程式

浮上体に働く吸引力は

$$f_{xx} = \frac{k(x_m - x)}{l_x^3} \quad (4.1)$$

$$f_{xy} = -\frac{ky}{l_x^3} \quad (4.2)$$

$$f_{yx} = -\frac{ky}{l_y^3} \quad (4.3)$$

$$f_{yy} = \frac{k(y_m - y)}{l_y^3} \quad (4.4)$$

ここで

$$l_x = \sqrt{(x_m - x)^2 + y^2}$$

$$l_y = \sqrt{x^2 + (y_m - y)^2}$$

である。空気などの粘性摩擦の影響を無視するとすると、浮上体の x 方向, y 方向における運動方程式は、次のように表すことができる。

$$m \ddot{x} = f_{xx} + f_{yx} - \frac{mg}{\sqrt{2}} \quad (4.5)$$

$$m \ddot{y} = f_{xy} + f_{yy} - \frac{mg}{\sqrt{2}} \quad (4.6)$$

4.4 制御システム

浮上システムの入力は, \mathbf{X}, \mathbf{Y} 軸の永久磁石を駆動する力とし, 永久磁石は弾性特性と減衰特性をもった機構で支持されているものとする。弾性特性と減衰特性は, システムの出力が浮上体位置だけであるので浮上システムの安定化のために必要である。

このシステムでは, 駆動力が一定では安定な浮上は行われなため, フィードバック制

御が必要である。浮上システムを安定化するための制御は、浮上体位置 (x, y) に基づいて、 X, Y 軸の各永久磁石の駆動力を独立に PD 制御するものとする。具体的には、 k_p, k_d をゲインとして次の制御則に従うものとする。

$$F_x = k_p x + k_d \dot{x} + F_{x0} \quad (4.7)$$

$$F_y = k_p y + k_d \dot{y} + F_{y0} \quad (4.8)$$

磁石およびその支持機構は X, Y 軸共に等しいとする。各軸上の磁石の運動方程式は次式となる

$$m\ddot{x} = -f_{xx} - \frac{mg}{\sqrt{2}} - k_e x_m - k_d \dot{x}_m + F_x \quad (4.9)$$

$$m\ddot{y} = -f_{yy} - \frac{mg}{\sqrt{2}} - k_e y_m - k_d \dot{y}_m + F_y \quad (4.10)$$

4.5 状態方程式

上のモデルを線形化し、状態ベクトル x_2 を $x_2 = (x \ y \ \tilde{x}_m \ \tilde{y}_m \ \dot{x} \ \dot{y} \ \ddot{x}_m \ \ddot{y}_m)$ とすると、次のような状態方程式が得られる。

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u_2 \quad (4.11)$$

$$y_2 = C_2 x_2 \quad (4.12)$$

ただし、入力 u_2 は、 $u_2 = (F_x \ F_y)'$ であり、

$$A_2 = \begin{pmatrix} \frac{k}{ml_0^3} & 0 & \frac{O_4 - 2k}{ml_0^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k}{ml_0^3} & 0 & \frac{-2k}{ml_0^3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-2k}{ml_0^3} & 0 & \frac{2k - k_e l_0^3}{m_m l_0^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{-k_b}{m_m} & 0 \\ 0 & \frac{-2k}{ml_0^3} & 0 & \frac{2k - k_e l_0^3}{m_m l_0^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{-k_b}{m_m} \end{pmatrix}$$

$$B_2' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_m} \end{pmatrix}$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

である。

4.6 線形性を考えた場合のフィードバックゲイン

本報告は2自由度浮上システムの特徴を把握することであるため、システムは簡単化を行ってもその一般性を失わない。ここでは、上に挙げた定数などの値を次のように正規化して用いた。

$$m=m_m=k=k_b=1, k_e=6 \quad (4.13)$$

フィードバック制御は各軸独立なPD制御で行う。このときの安定なフィードバックゲインの範囲は、1自由度システムでは比較的簡単に求められるが[5]、2自由度システムでは非常に複雑になる。よって、ここでは微分ゲインを固定し、比例ゲインの安定範囲を求めることにより、1自由度システムと2自由度システムを比較する。

今、 $k_d=1.2$ とする。このときフィードバックを行ったシステムを自律形として考えて、

その安定性を考察するためにフルビッツの安定判別法により,比例ゲイン k_p の範囲を求めた. その結果は,

$$4 < k_p < 5.12 \quad (4.14)$$

の範囲で安定となることがわかった. 永久磁石を使った浮上では, 比例ゲインの安定範囲に下限と上限があるが, 2自由度システムでは, 小さな値となっている. これは, 2自由度システムでは, X 軸方向の運動に対し, Y 軸上の磁石の吸引力における横方向成分が復元力として働くため, その成分が比例ゲインに重畳しているためにその安定範囲が小さな値になると考えられる.

4.7 数値シミュレーション

提案した浮上システムは, その吸引力の特性に非線形性を持つ. よってここでは, 非線形性を考慮した数値シミュレーションによって, より実際に近いであろうと思われるシステムの挙動の違いを調べる.

フィードバックゲインは, 線形システムにおいて安定となるようなゲインを用いた. 2自由度システムでは $(k_p \quad k_d) = (4.5 \quad 1.2)$ とした. 初期位置は, $(x \quad y) = (0.1 \quad 0)$ とした.

シミュレーション結果を Fig.4.3 に示す.

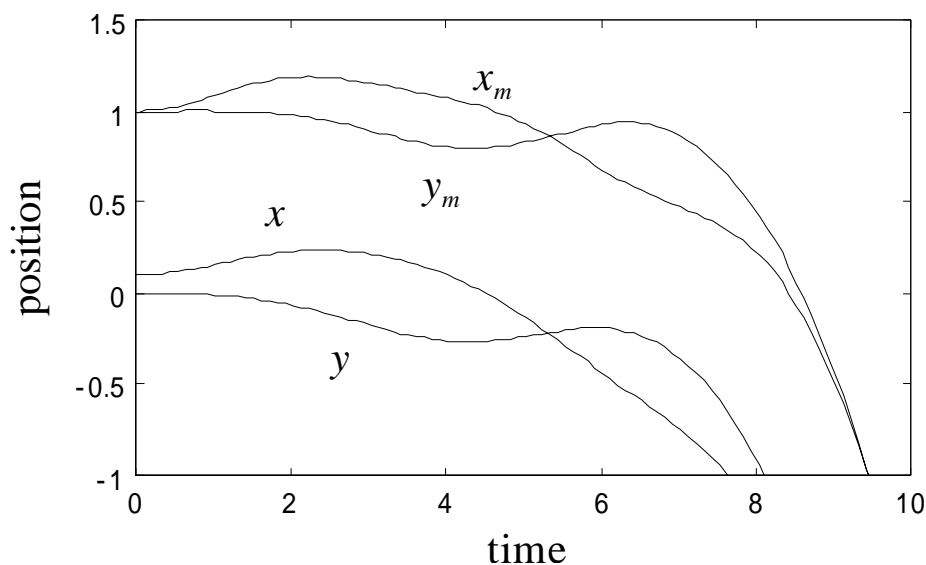


Fig.4.3 Simulation result of 2 d.o.f. system

また、2自由度の場合の浮上体の軌跡を Fig. 5 に示す。図からわかるように安定な浮上状態となっていない。軌跡の図より最終的に、浮上体が鉛直に落下していることがわかる。なお、Fig. 3 の永久磁石の平衡位置は、実際の位置から 0.5 だけ下にあるように表している。

次に2自由度システムに対して、初期位置を $(x, y) = (0.03, 0)$ にして計算した結果を Fig. 6 に示す。ゲインは Fig. 4 の場合と同じである。この場合は安定な浮上状態が実現できている。この結果、安定状態が初期偏差の影響を受けるということがわかった。これは、システムの非線形性の影響であると考えられる。また、このシステムは外乱に弱いということも言える。この対策として、 X, Y 軸のクロスフィードバックループを加えることやロバスト制御を用いることなどが考えられる。

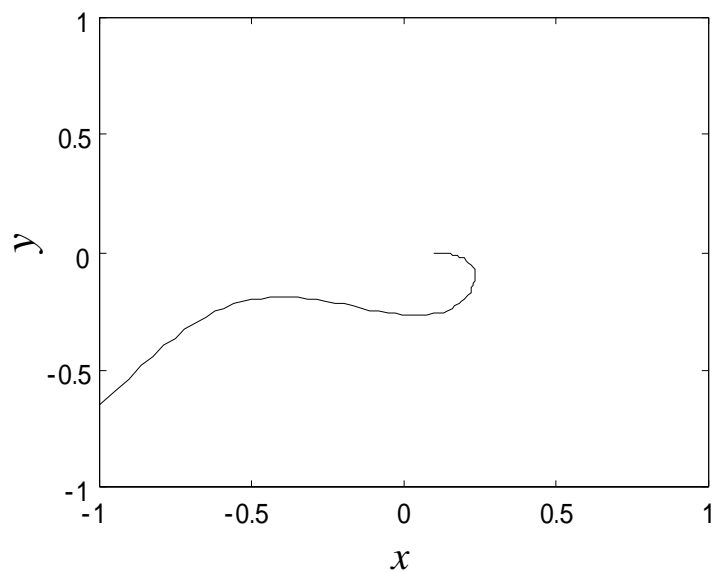


Fig.4.4 Simulation result of 2 d.o.f. system

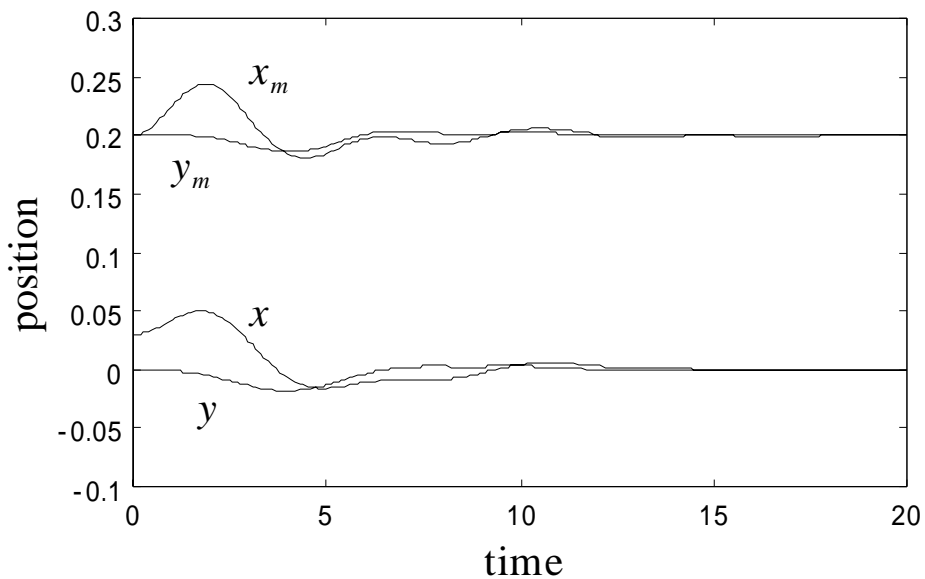


Fig.4.5 Simulation result of 2 d.o.f.

4.8 磁場解析

式(4.5),(4.6)を計算するためには,磁力である f_{xx} などを求めなければならない.そのため磁場解析と実際の吸引力の測定を行った.

Fig.4.6 および Fig.4.7 は磁場解析の結果である.白く見えるのが永久磁石であり,左下に丸く見えるのが浮上対象の鉄球である.それぞれ実験装置と同じ形で磁石中心と浮上対象のギャップは5mmになるよう配置し,これを45度傾けた状態で解析を行った.Fig.4.5は2つの磁石が浮上対象に対して異なる極を向けたときの結果である.一方の磁石から出た磁束線は浮上対象の中を通りもう一方の磁石に抜けていることがわかる.

また本研究ではこの磁石の配置を異極対向と,同じ極を磁石が浮上体に対して向けている場合は同極対向と表記する.Fig.4.6は同極対向の解析結果である.磁束線は浮上対象の中央付近で反発しあうように通っている.以上の解析を浮上体の配置を浮上実験時の水平方向へ原点を中心とし $\pm 4\text{mm}$ の間で0.5mmづつ水平方向,鉛直方向の磁力を解析した.その結果を Fig4.8 に水平方向, Fig4.9 に鉛直方向の磁力の変化をそれぞれ示す.

解析結果より磁石の向きによって吸引力の差がある原因としては Fig.4 . 6 の異極対向のときは磁路が短いためこのような結果になったと考えられる . Fig4.8 からは原点から $\pm 1.5\text{mm}$ の範囲における水平方向の磁力において異極対向 , 同極対向ともに距離的には磁石に近いが力の向きは距離の離れた磁石の方向に働いている . またこの範囲では同極対向が異極対向に比べ力の変化が顕著である .

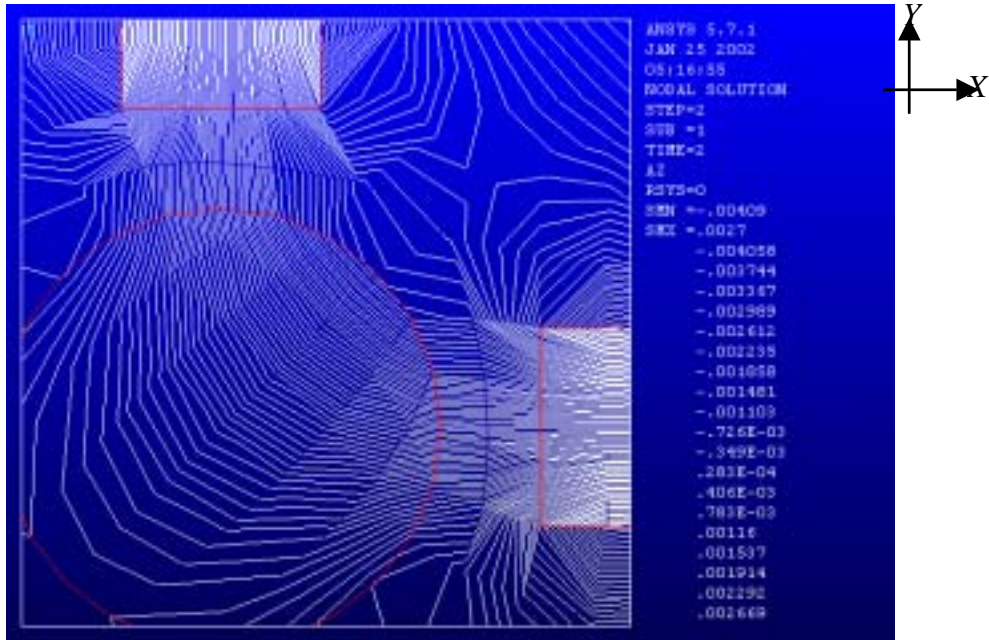


Fig.4.6 magnetic flux diagram (opposite poles face to object)

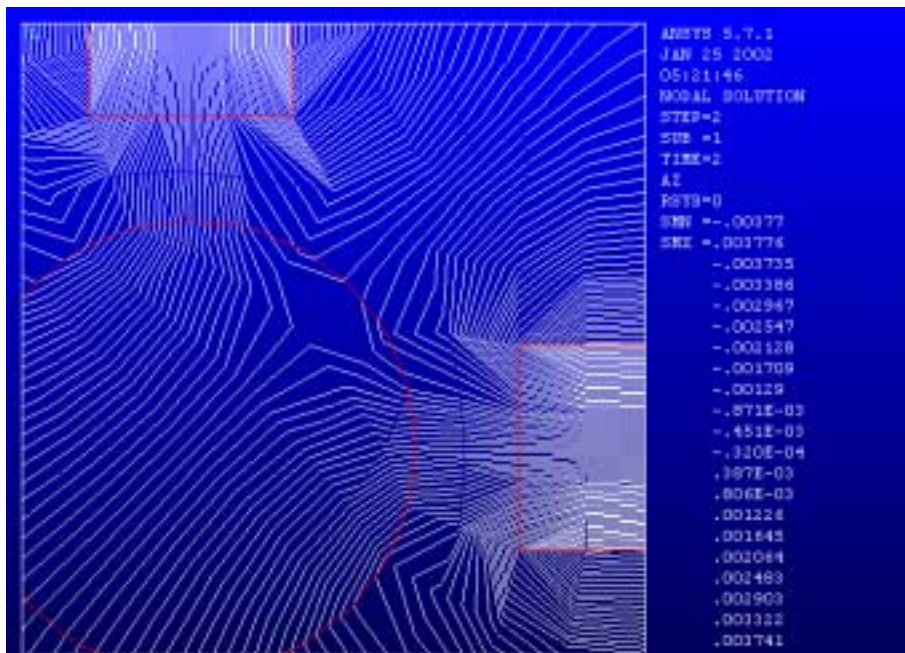


Fig.4.7 magnetic flux diagram (same poles face to object)

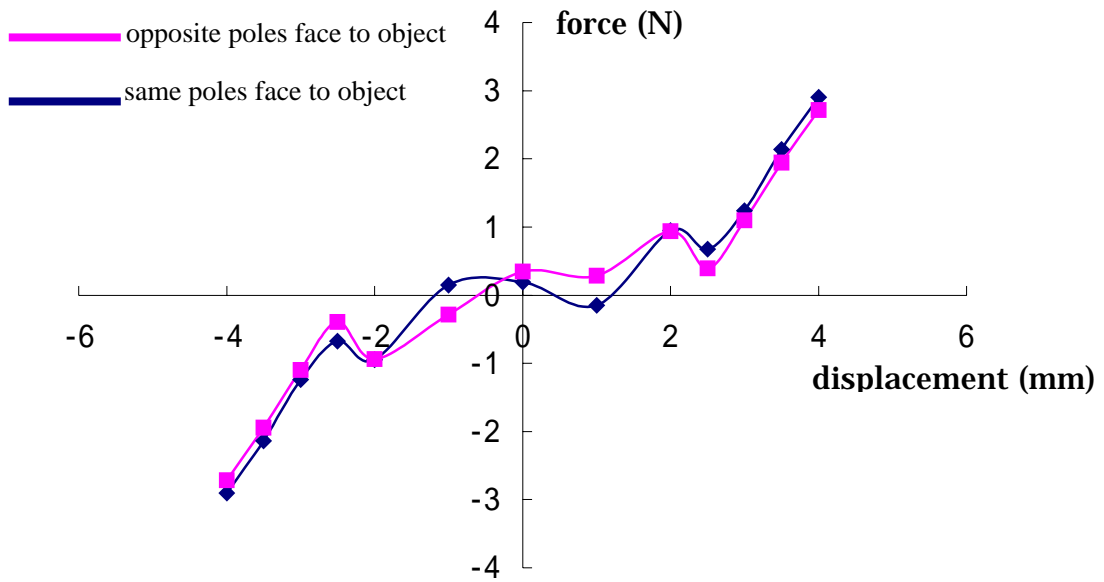


Fig4.8 Result of magnetic field for horizontal analysis

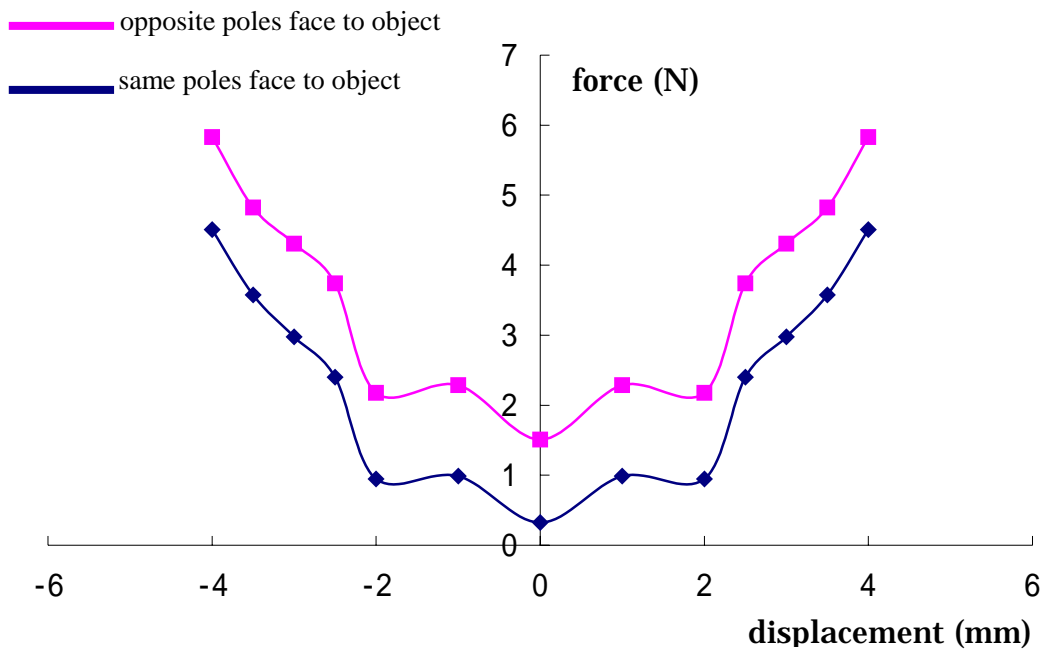


Fig4.9 Result of magnetic field for vertical analysis

4.9 磁力の計測

次に実際の吸引力の値を測るため実験を行った。Fig.6 にそれを示す。永久磁石と浮上体は磁場解析時と同じ配置である。また計測では原点を中心とし X 軸方向に $\pm 7\text{mm}$ 動かし 0.5mm 間隔で X 軸方向と Y 軸方向に働く磁力を計測した。

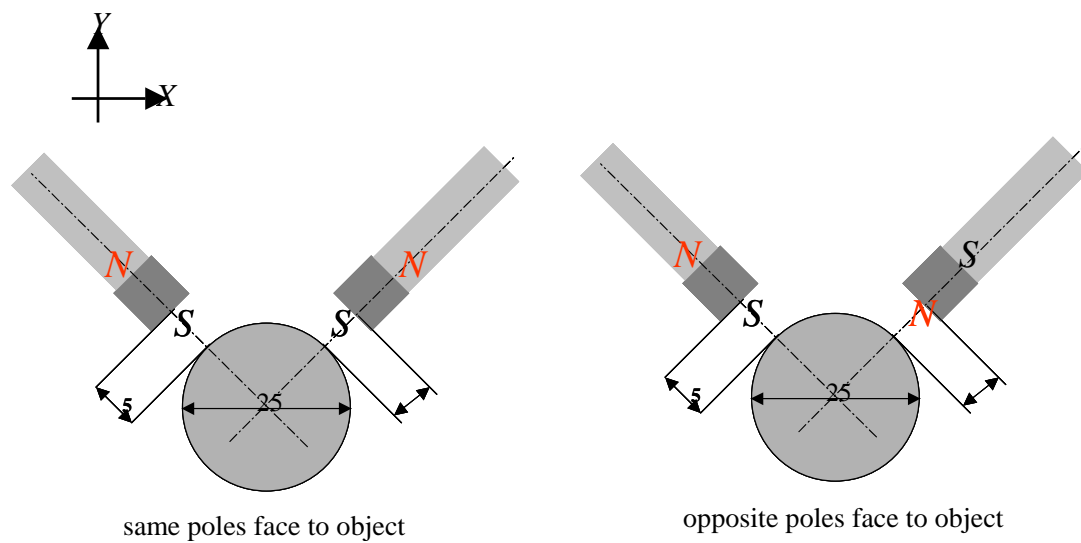


Fig4.7 Outline of experimental set up

Fig4.8 と Fig.4.9 は実験時で考えると水平方向の支持力を表しており、Fig.4.8 は異極対向、Fig.4.9 は同極対向の計測結果である。X 軸方向と Y 軸方向は磁石の位置を示しており、その位置での鉄球にかかっている支持力を縦軸に示したもので右向きを正とし、X 軸 $\pm 7\text{mm}$ 、Y 軸 $\pm 3.5\text{mm}$ を各 0.5mm 間隔で計測した。磁石は X 軸の $\pm 6.5\text{mm}$ の位置にそれぞれある。

計測結果から原点付近における X 軸方向の支持力の向きが、浮上体が右側磁石に距離的には近いが、支持力は左向きであり、同じく鉄球が左側磁石に近くとも力は右向きにかかっている。水平方向の力の大きさは同極対向より異極対向に配置したときのほうが大きい、しかしその力の変化は同極対向の場合が顕著に変化している。

次にFig4.9とFig4.10は同じ計測方法で異極対向と同極対向における実験時の鉛直方向の支持力を表したものである。この結果からは同極対向のほうが鉛直上向きの方に大きな力が働いていることがわかる。また、異極対向に比べその力の変化も緩やかである。

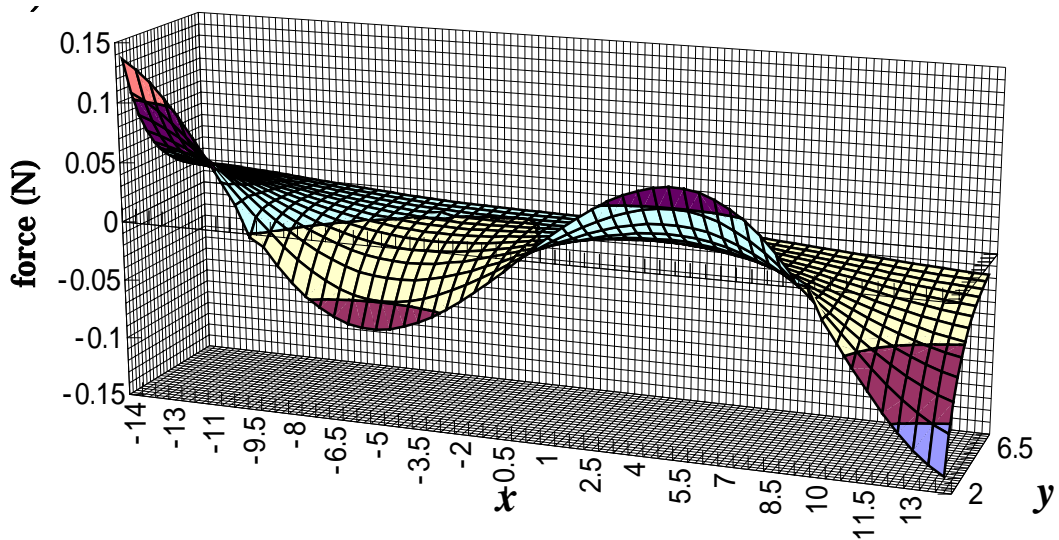


Fig4.8 Result of magnetic force for horizontal direction (opposite poles face to bject)

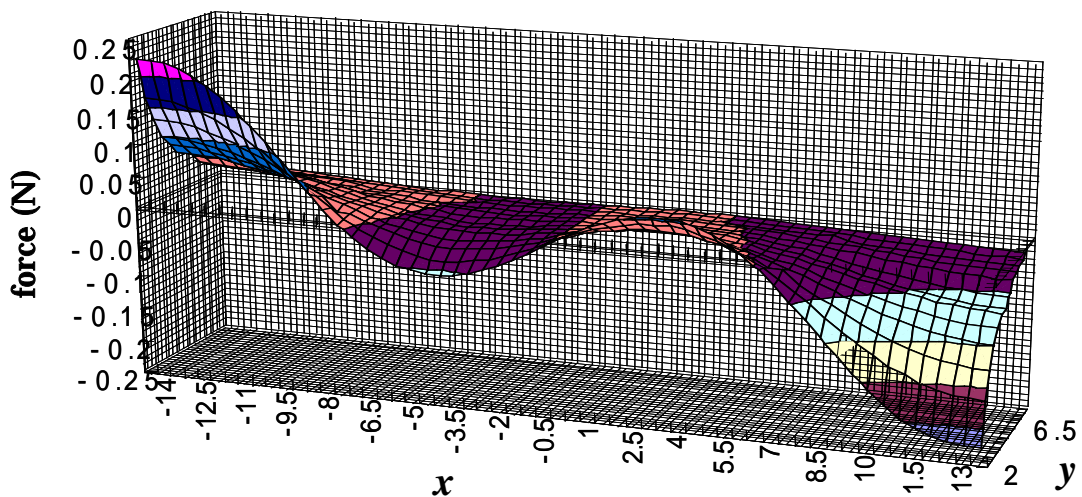


Fig4.9 Result of magnetic force for horizontal direction (same poles face to object)

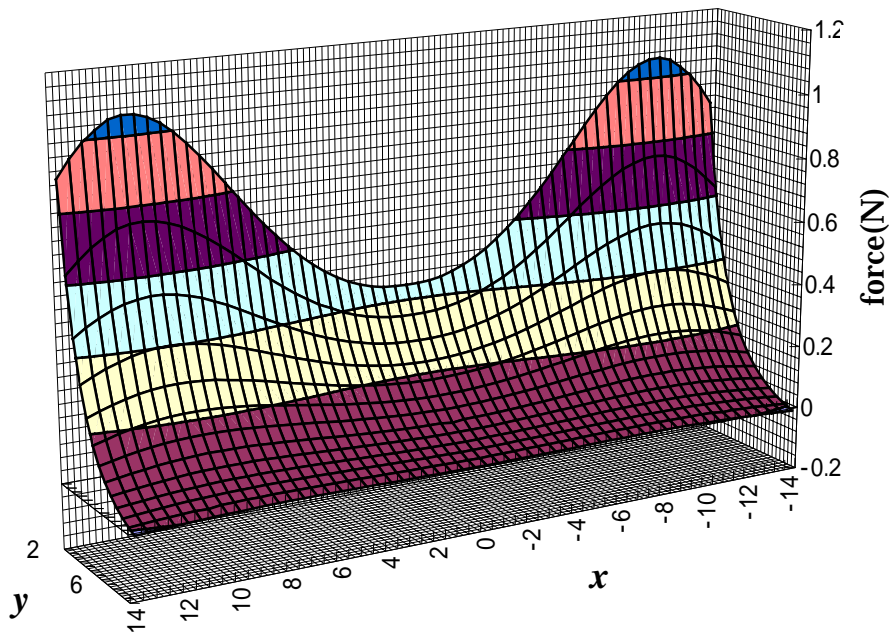


Fig4.10 Result of magnetic force vertical direction(opposite poles face to bject)

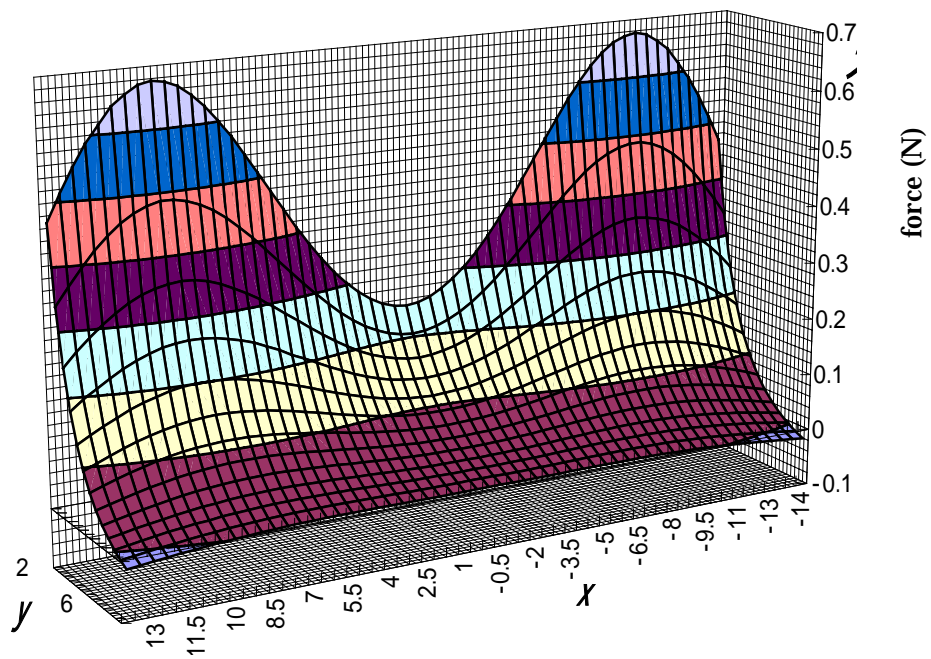


Fig4.10 Result of magnetic force vertical direction (same poles face to object)

また、これらの目標値近傍を拡大したものが Fig4.11 と Fig4.12 である。Fig4.11 は永久磁石の配置が同極対向の場合の X 軸方向の磁力の変化であり、Fig4.12 は同極対向の Y 軸方向の磁力の変化である。その変化は水平方向において急激な磁力の変化が起こっている。一方、鉛直方向の力の変化は緩やかであることがわかる。

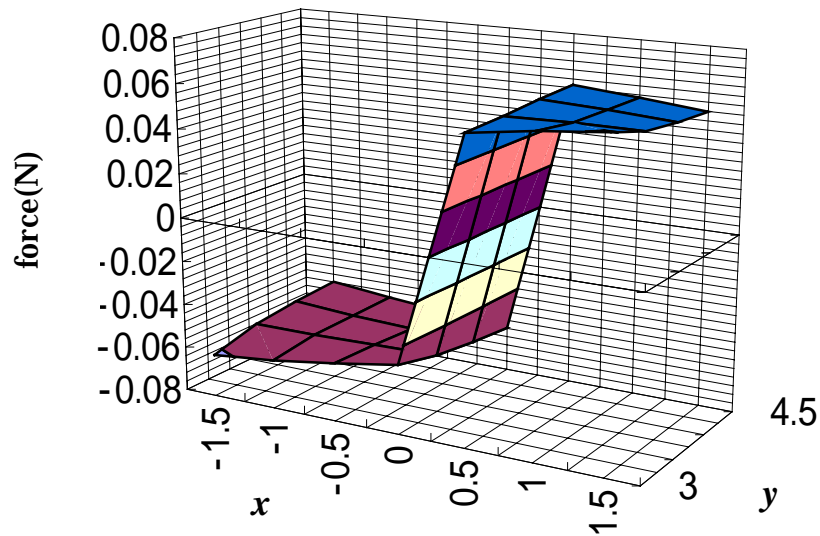


Fig4.11 Detail drawing of magnetic force vertical direction (same poles face to object)

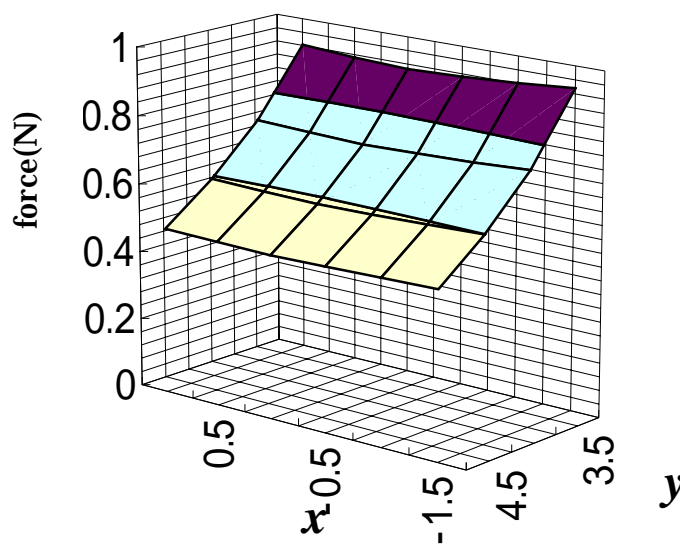


Fig4.11 Detail drawing of magnetic force horizontal direction

(same poles face to object)

4.10 アクチュエータ2つ配置による浮上実験

実験において永久磁石の配置は線形性を考慮して、鉛直方向の磁力は異極対向に比べ小さいが、浮上に必要な磁力は十分あり、水平方向の磁力の変化が緩やかである同極対向を用いることにした。また、フィードバックゲインは最適レギュレータ理論により導出 $k_p = 1119$, $k_d = 10.9$ とした。その結果を Fig4.12 に示す。

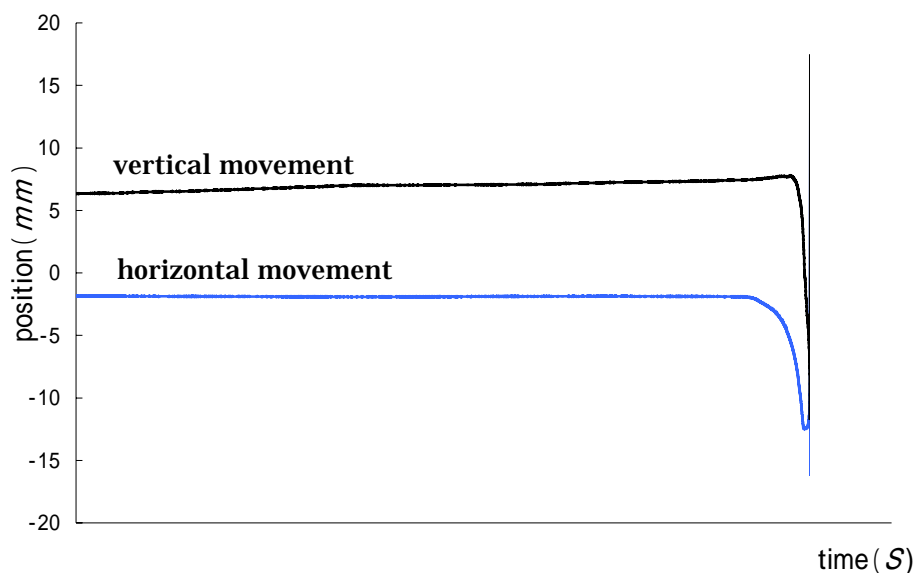


Fig4.12 Result of levitate experiment

結果からは安定な浮上の実現していないことがわかる。鉛直方向に支持力が加わりだすと水平方向に浮上対象が落ちてしまっている。また、フィードバックゲインの値を変化させ浮上実験を行ったが結果は同じであった。この原因としては原点付近において磁場解析、計測でも見られたように複雑な磁力が鉄球に働いており、モデル化がうまくいっていないことが考えられる。

以上より、この磁石配置では安定な浮上の実現は難しいと考え磁石の配置変更と更なる磁場解析と磁力計測が必要であると考えた。

4.11 アクチュエータを3つ配置した2自由度浮上装置

今までの考察より磁石配置の再検討を行った．今回の実験では先の実験において判明した浮上体に働く複雑な磁力を考慮し鉛直方向の制御と水平方向の制御を独立して考えることにした．試作した鉛直方向，水平方向独立型の2自由度浮上装置を Fig4.13 に示す．実験に用いるセンサやアクチュエータは先の実験と同じものである．

Fig4.13 に示されるような2自由度浮上システムを考察するための概略図を Fig4.14 に示す．先ほども述べたように今回は水平方向と鉛直方向の運動を独立して考える．

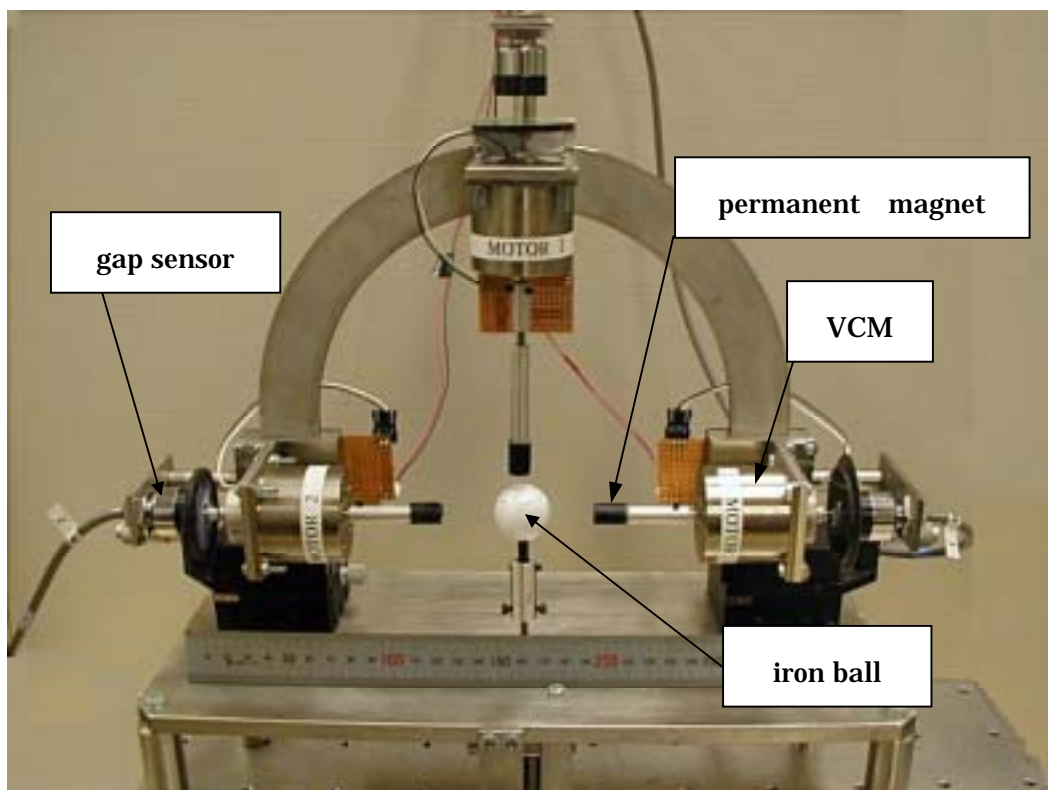


Fig.4.13 Photograph of experimental setup

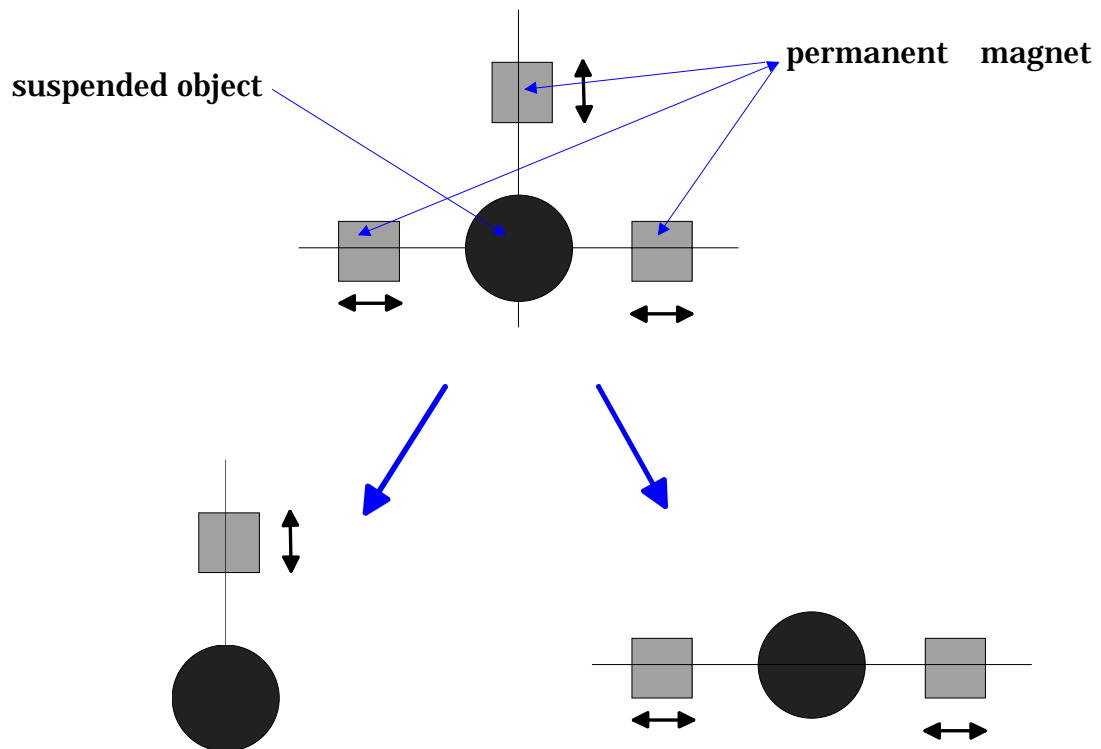


Fig.4.14 Outline of two types of suspension system

4.12 浮上システムのモデル化

前章で述べた2自由度浮上システムの浮上方向の考察はすでに行われているので今回は水平方向の位置制御について考察を行う．また以下のようにモデル化することができる．

記号を以下に示す．

z_0 : 浮上体位置 ,

m_0 : 浮上体質量 ,

D : 浮上体の直径 ,

z_1 : 右側磁石の先端位置 ,

z_2 : 左側磁石の先端位置 ,

m_1 : 右の磁石質量

m_2 : 左の磁石質量 ,

K : 磁石の係数 ,

f_{a1} , f_{a2} : 各磁石に対する駆動力 ,

f_{m1} , f_{m2} : 各磁石が浮上体に及ぼす吸引力 ,

d_1 , d_2 : 各磁石と浮上体表面までの距離 ,

k_1 , k_2 : 磁石を支持するばね定数 ,

c_1 , c_2 : 磁石支持部の減衰係数 ,

g : 重力加速度

浮上体に働く Z 軸方向の吸引力は

$$m_0 \ddot{z}_0 = f_{m1} + f_{m2} \quad (4.15)$$

ここで

$$f_{m1} = \frac{K}{d_1^2} \quad d_1 = z_1 - z_0$$

$$f_{m2} = \frac{K}{d_2^2} \quad d_2 = \left(z_0 - \frac{D}{2} \right) - z_2$$

である. 空気などの粘性摩擦の影響を無視するとすると, 浮上体の Z 軸方向における運動方程式は, 次のように表すことができる.

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 \dot{z}_1 + k_1 z_1 = f_{a1} - f_{m1} \quad (4.16)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + c_2 \dot{z}_2 + k_2 z_2 = f_{a2} + f_{m2} \quad (4.17)$$

浮上システムの入力は水平方向の永久磁石を駆動する力とし, 永久磁石は弾性特性と減

衰特性をもった機構で支持されているものとする。

弾性特性と減衰特性は，システムの出力が浮上体位置だけであるので浮上システムの安定化のために必要である．このシステムでは，駆動力が一定では安定な浮上は行われぬためフィードバック制御が必要である．浮上システムを安定化するための制御は浮上体位置に基づき k_p, k_d をゲインとして次の制御則に従うものとする．

$$f_{d1} = k_p z_1 + k_d \dot{z}_1 + F_{z0} \quad (4.18)$$

$$f_{d2} = k_p z_2 + k_d \dot{z}_2 + F_{z0} \quad (4.19)$$

4.13 磁場解析

永久磁石の配置ではアクチュエータを3つ用いるが今回の浮上装置においても浮上の安定化，モデルの線形化を考えた上で磁石の極性を定めることが必要である．

また，今回の磁場解析では前回よりも詳細な浮上体周辺における磁力を解析するため3次元と2次元の2つの解析を行った．磁石の極性は例えば浮上体表面に対して鉛直方向はS極，水平方向はともにN極を対向させている場合，これをSNN配置と本研究は表記する．SNNは前から鉛直方向の磁極，右の永久磁石の磁極，左の永久磁石の磁極を表している，今回の磁場解析においてはSSS配置，SNN配置，SSN配置の3通りの磁場解析を行った．

結果はFig.4.15がSSS配置，Fig4.16がSNN配置，Fig4.17がSSN配置の3次元解析の解析を示す．各図とも上図が，磁石が浮上体に及ぼす磁力を示し，下図が浮上体自体に働いている磁力を示す．上図において磁力の強いところは赤く表示され浮上体の図ではわかりやすくするために等高線を用いて磁力を表している．また，Fig4.18はSSS配置，Fig4.19はSNN配置，Fig4.20はSSN配置の2次元の解析結果であり，これらは上図に磁力を

表し、磁束線図を下図に表している。下図中の線は磁束線を表しておりそれが集まり白く見える部分が磁石であり、中央付近の円形が浮上体である。磁石と浮上対象のギャップは全て 5mm である。これを初期値として水平方向に $\pm 3\text{mm}$ の範囲で任意の位置に浮上体を動かし磁場解析を行った。解析結果から磁束が浮上体の中心付近で反発しあうように通っているのが分かる。

Fig.4 .21 はこれらの水平方向における磁力の解析結果であり、virtual work と maxwell stress tensor の 2 通りの結果を示している。同じく Fig4.22 は各磁石配置における鉛直方向の磁力の変化である。

水平方向の解析結果からは SSS 配置と SNN 配置の結果がほぼ同じである、SSN 配置は原点付近で浮上体に左向きの力が働いていることがわかる。

鉛直方向の解析結果からは初期値の付近で顕著な磁力の変化が確認できる。また、浮上体に働く磁力は大きい順に SSN 配置、SNN 配置、SSS 配置となっている。これは各磁石配置における磁路の差であると考えられる。

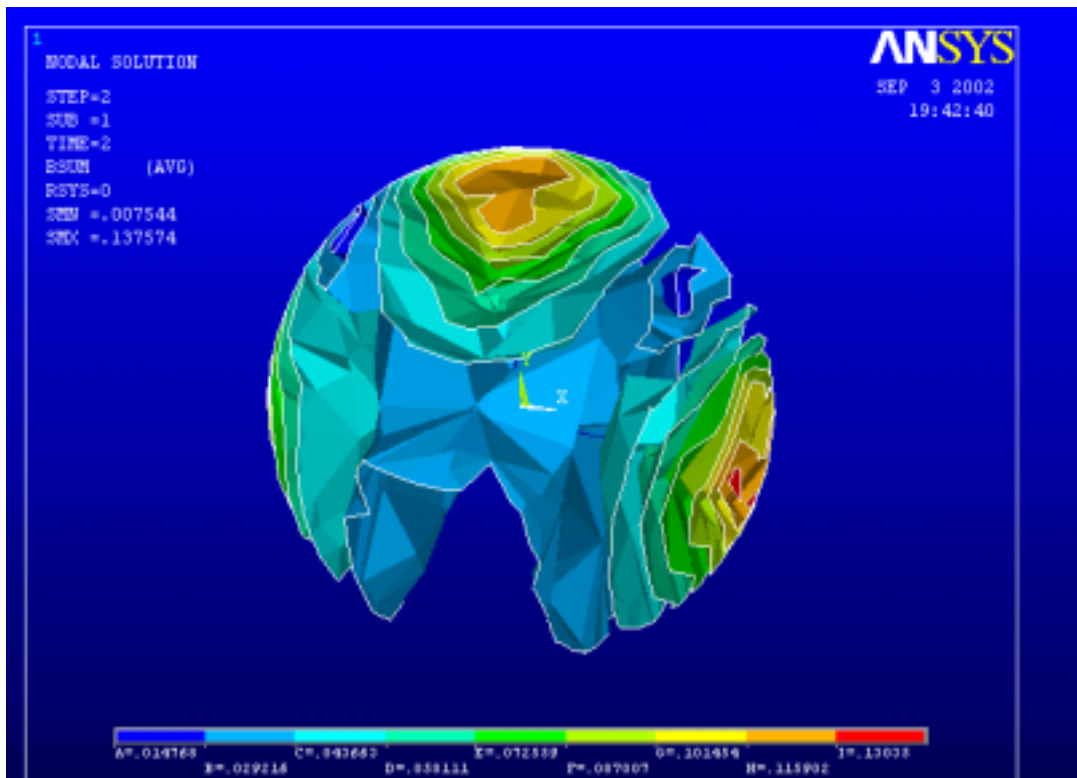
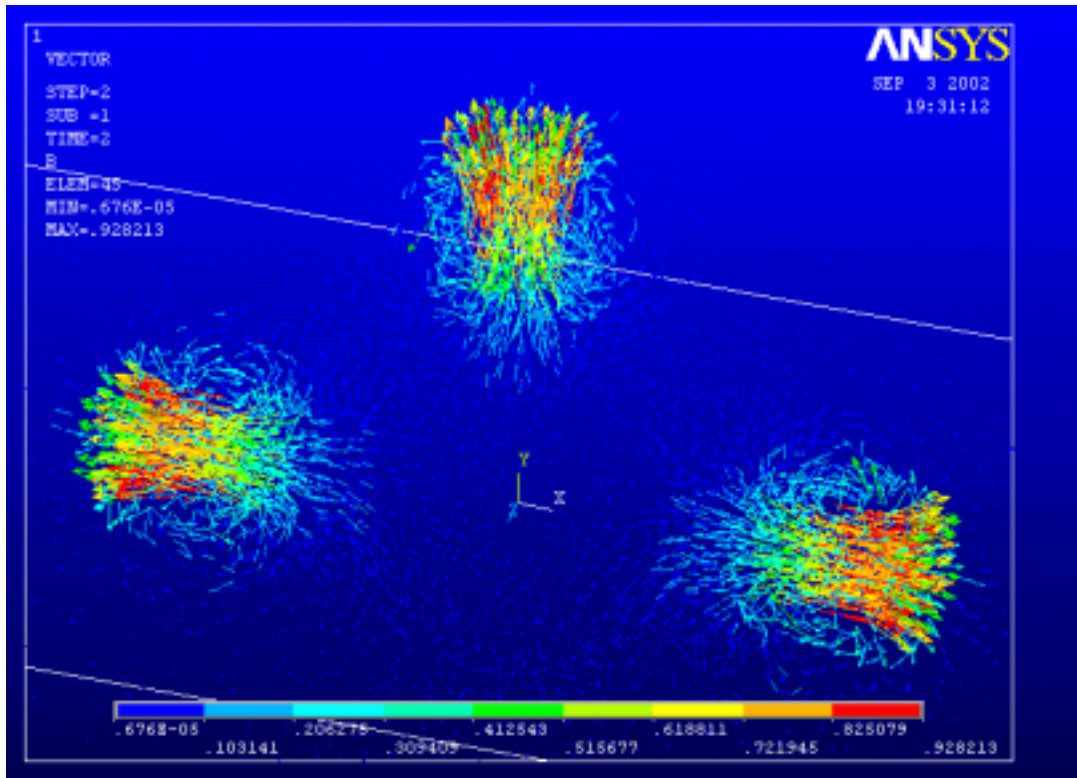


Fig4.15 Result of magnetic force 3D analysis (SSS)

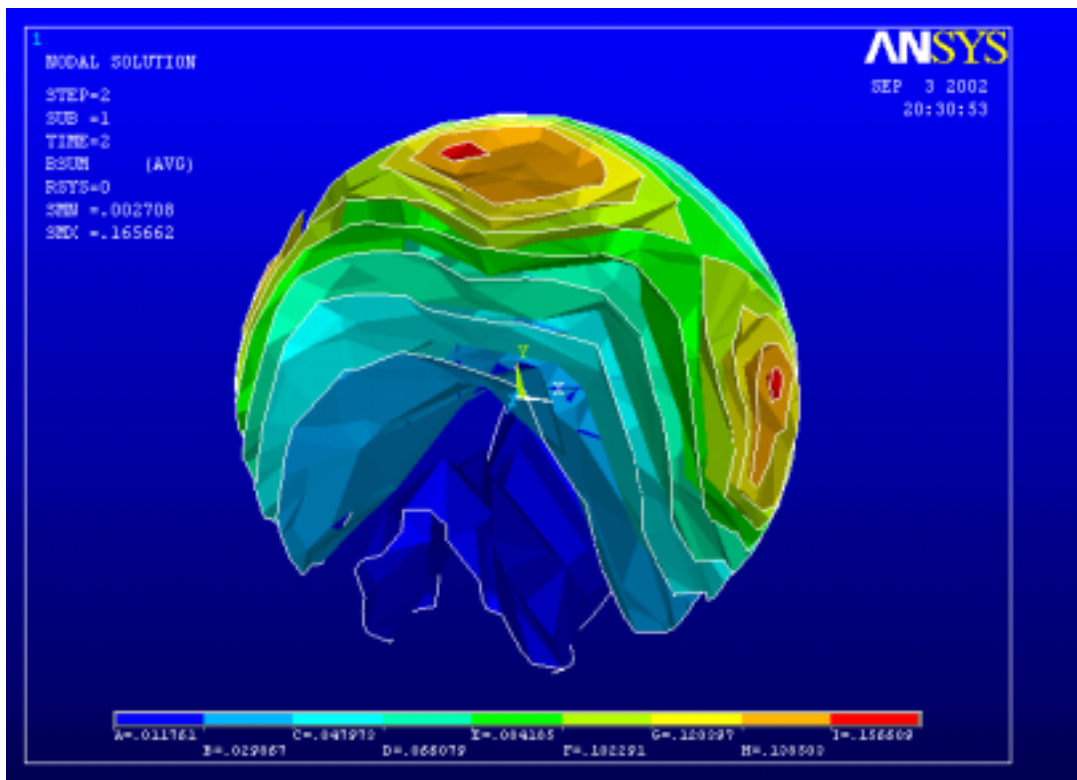
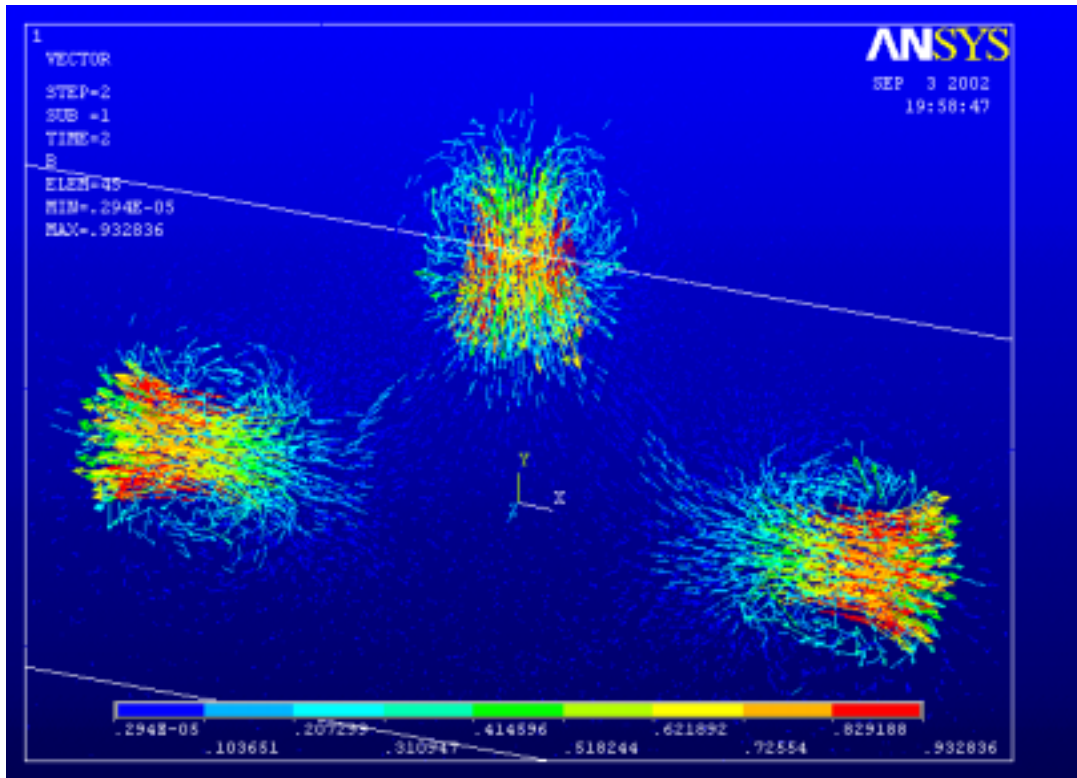


Fig4.16 Result of magnetic force 3D analysis (SNN)

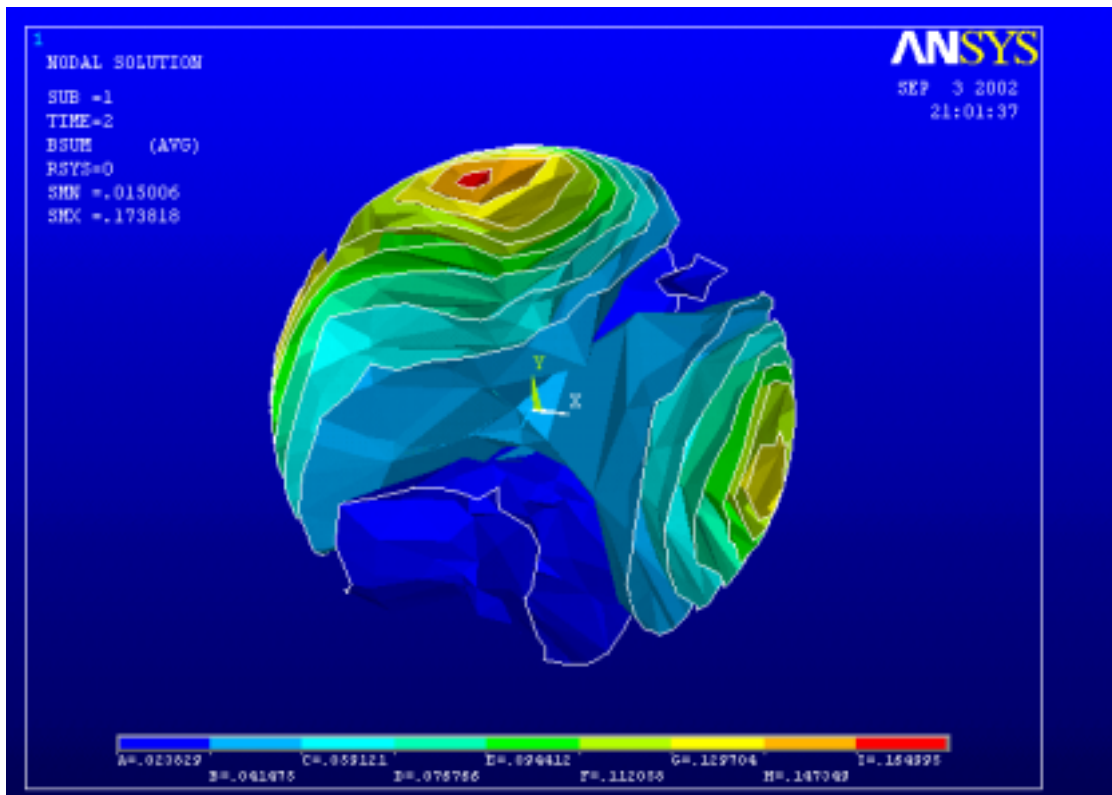
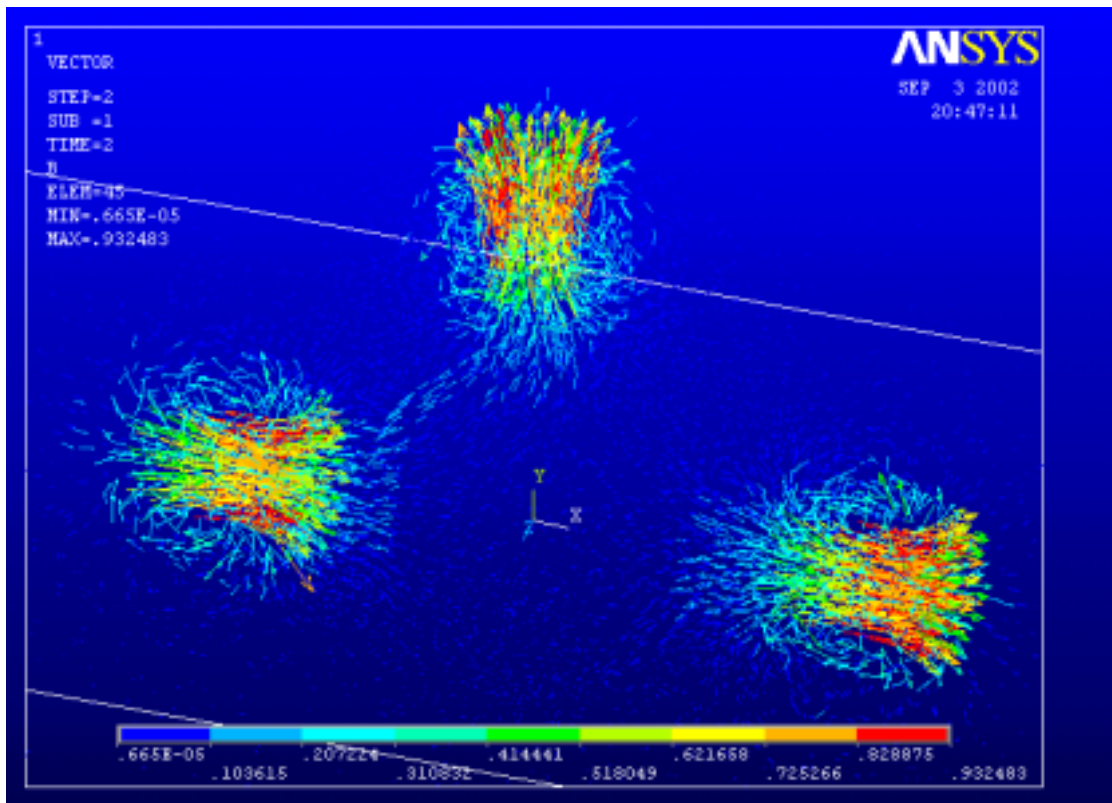


Fig4.17 Result of magnetic force 3-D analysis (SSN)

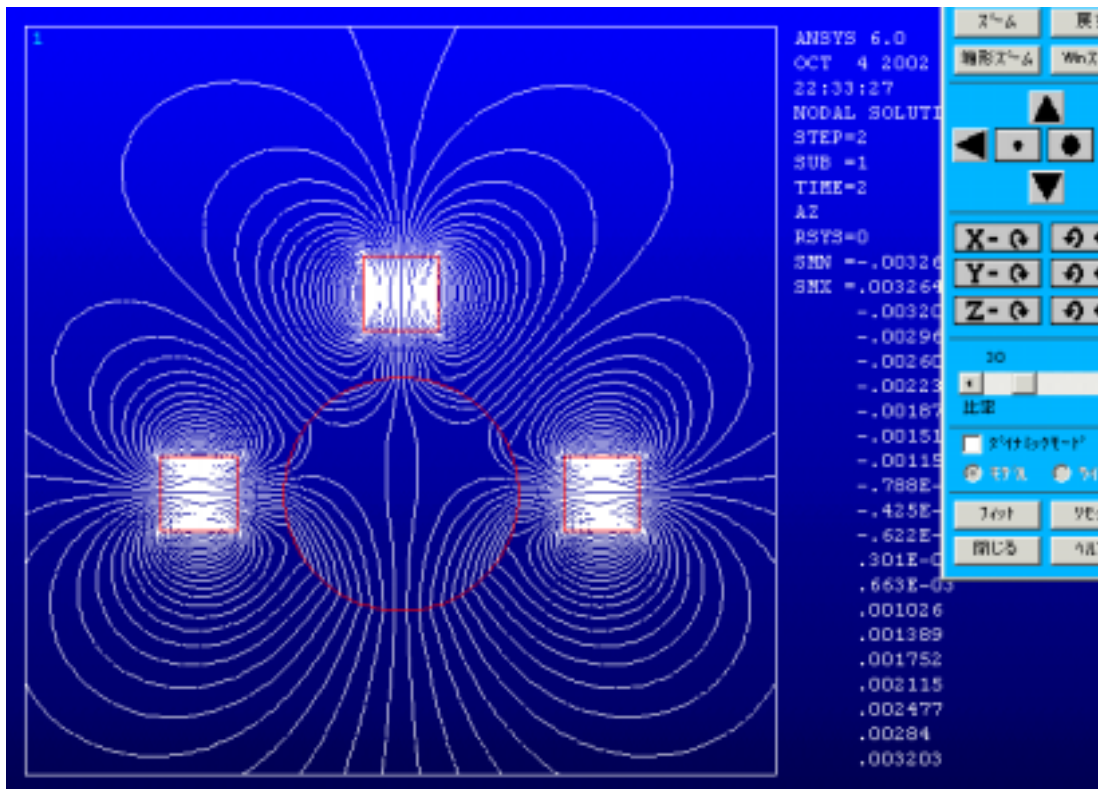
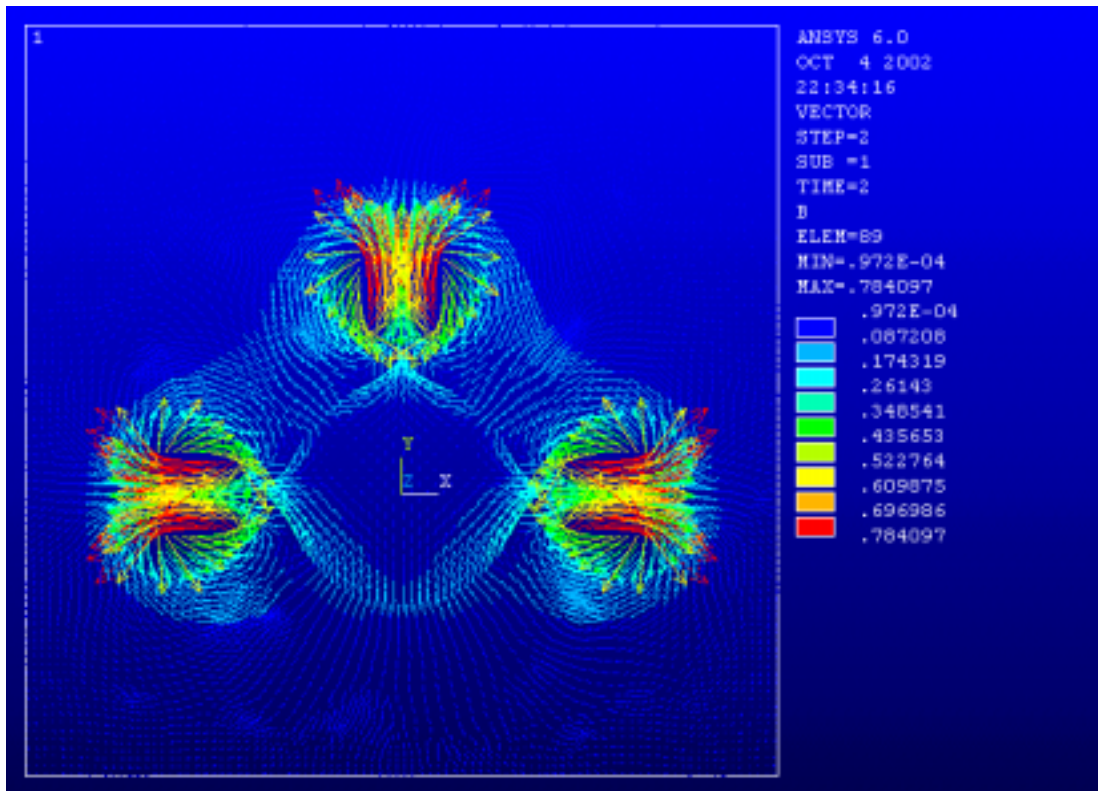


Fig4.18 Result of magnetic force and flux diagram 2-Danalysis (SSS)

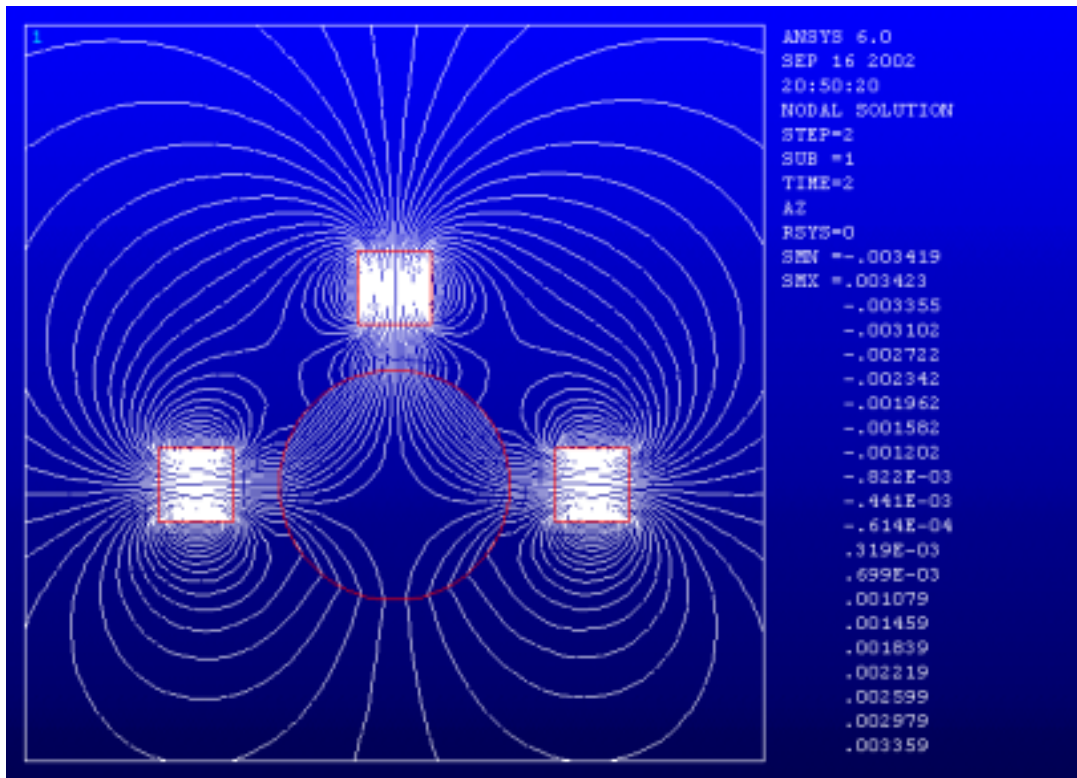
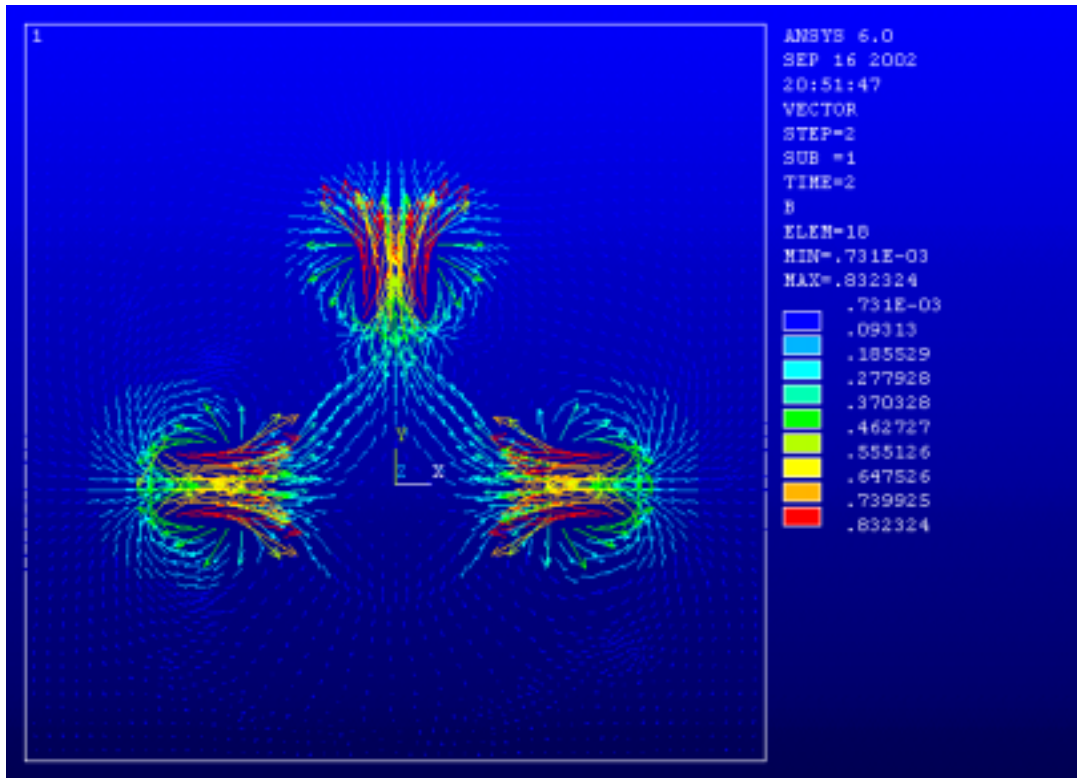


Fig4.19 Result of magnetic force and flux diagram 2-Danalysis (SSS)

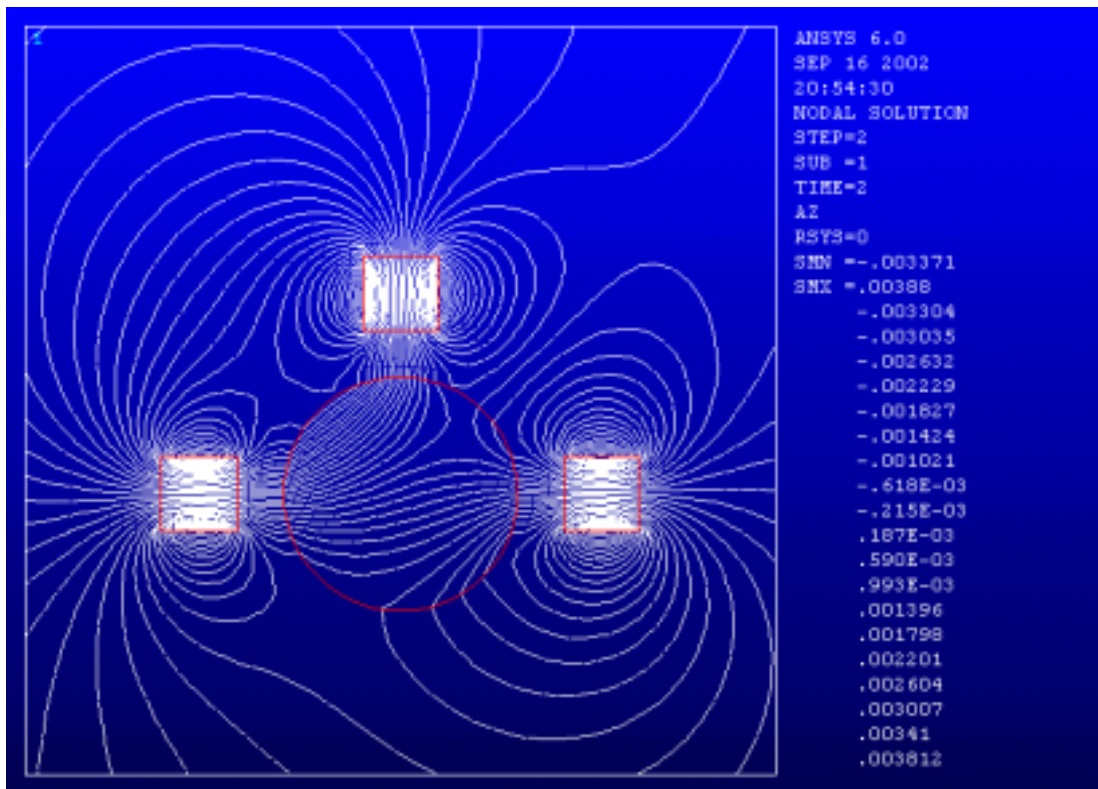
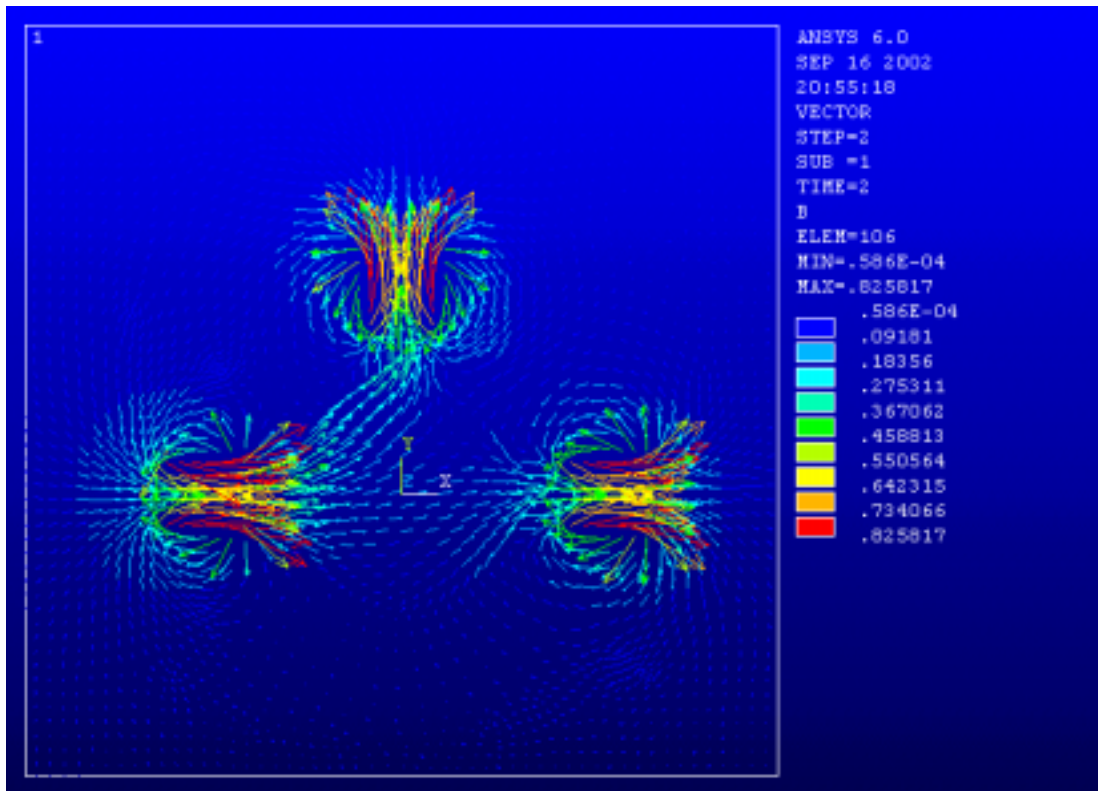


Fig4.20 Result of magnetic force and flux diagram 2-Danalysis (SSS)

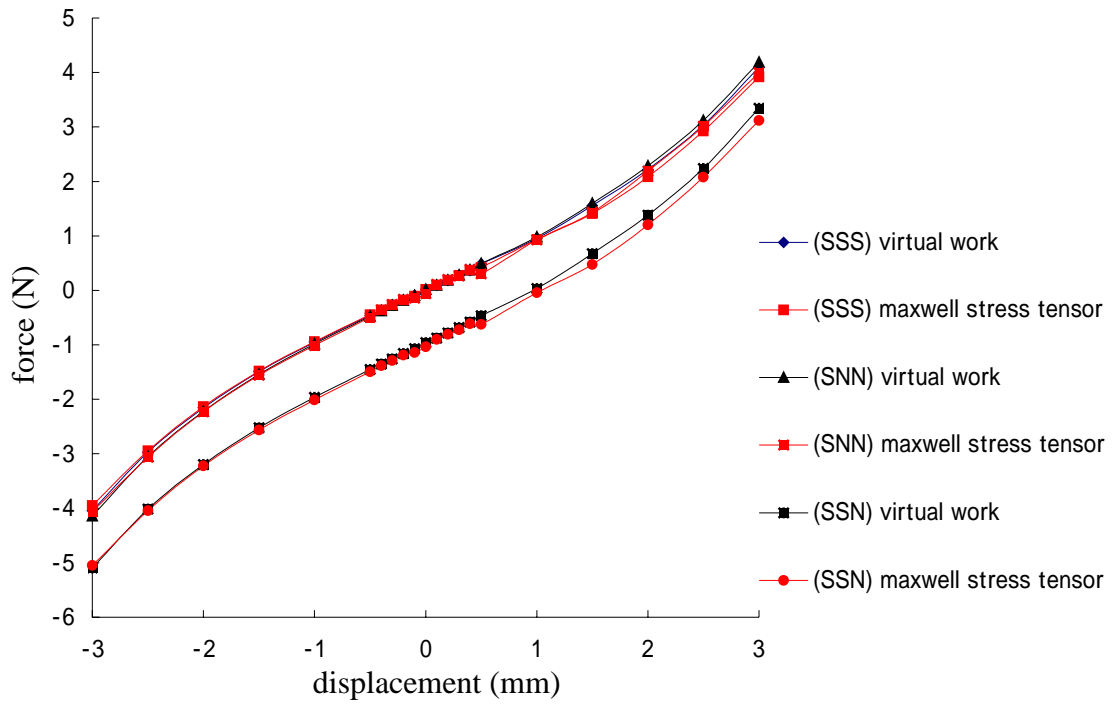


Fig4.21 Result of magnetic field horizontal analysis

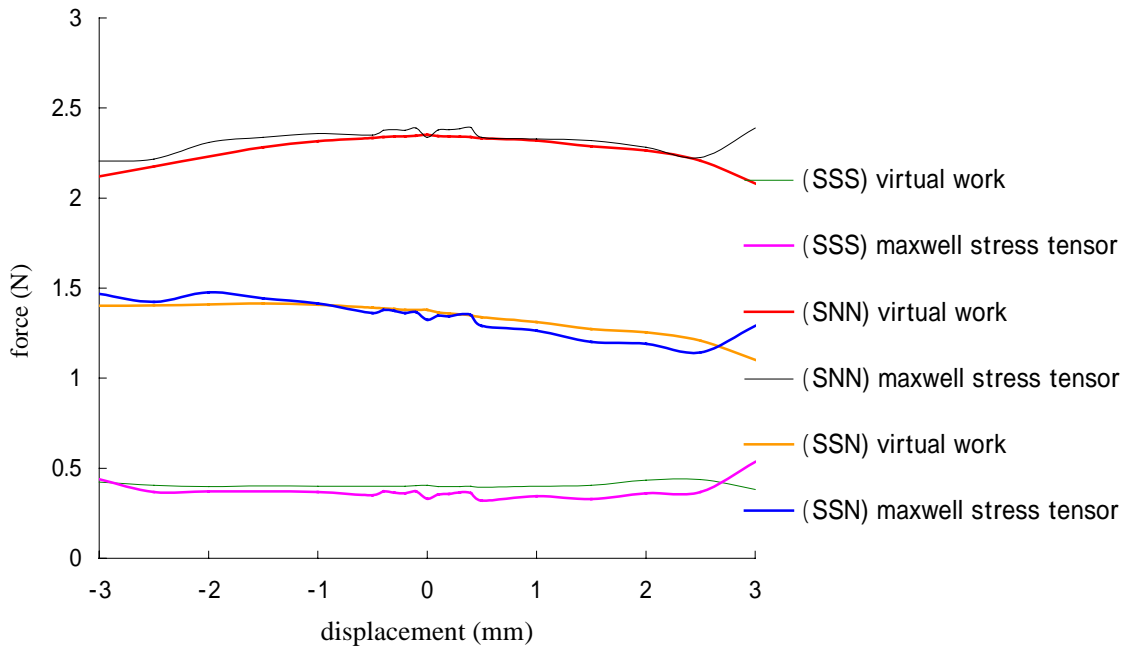


Fig4.22 Result of magnetic field vertical analysis

5 . 実験と考察

5.1 浮上実験

実験では磁石の配置を水平方向の力が原点付近で0となり鉛直方向の磁力が大きい(SNN)配置を使用した .

以上のから最適フィードバック理論に基づき PD 制御における水平方向のフィードバックゲインを導出 $k_p = 1500$, $k_d = 15$ とし , 水平方向の安定性を確認するため $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$ と 12mm の2つで浮上実験を行った . また , 鉛直浮上方向の制御には予備実験で行った1自由度浮上システムをそのまま使い , 水平方向のシステムを別に作り同時に制御を行ったが2つは干渉し合うことなくまったく独立した制御を行っている . そして2自由度浮上実験において成功した . その様子を Fig5.1 に示す . 中央付近に白く見える球状のものが鉄球であり , 上方から伸びてきているのが鉛直方向を制御する磁石部である . また左右から出ているのが水平方向を制御するための磁石部である .

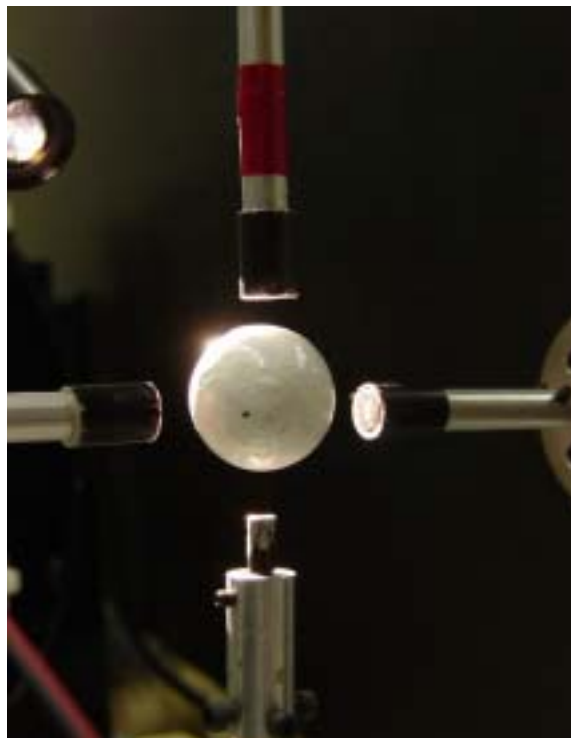


Fig5.1 photograph during 2.d.o.f suspension

5.2 周波数応答

Fig.5.2 と Fig.5.3 は浮上時の水平方向に周波数 0.02 ~ 50Hz , 振幅 1mm の正弦波を入力として与えたときの周波数応答の結果である . Fig.5.2 は目標値 $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$, Fig.5.3 は目標値 $d_1 = d_2 = 12\text{mm}$ の際の応答をあらわしている . この結果 , とともに水平方向で 3Hz 程度の応答が可能なが示され , 本方式による非接触把持が可能であることがわかった .

たが , $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$ の 5Hz 付近の応答において浮上体が共振するような激しい挙動をみせた . また , $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$, $d_1 = d_2 = 12\text{mm}$ の応答とも 15Hz 以上の周波数帯ではまったく追従することなく浮上体の挙動が激しくなり , 浮上自体も 30Hz を境に確認できなかった .

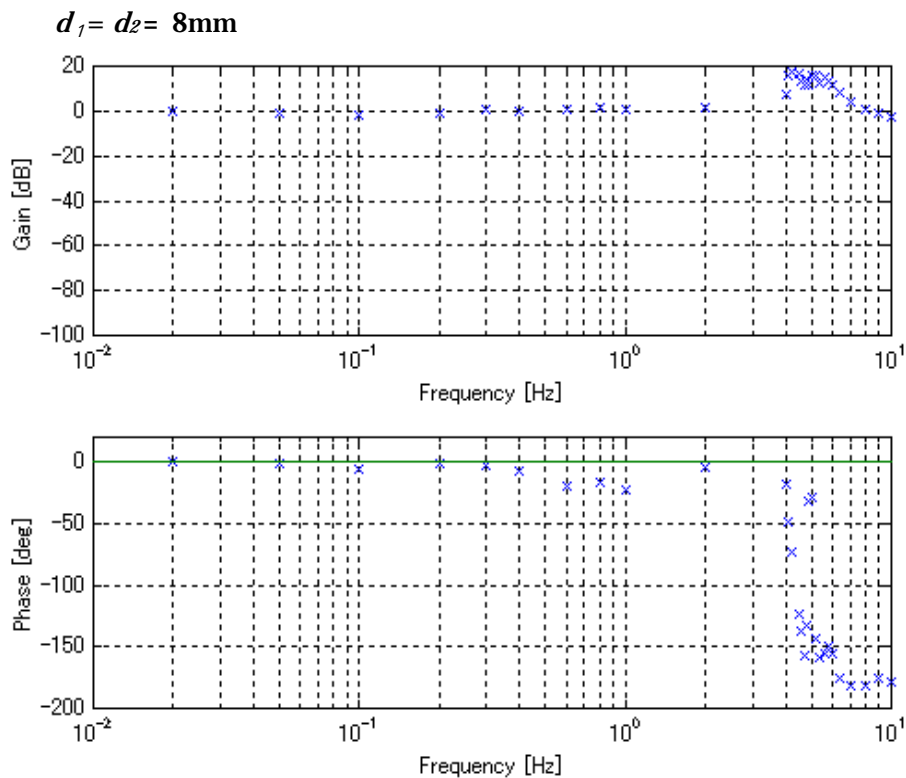


Fig5.2 Experimental result of frequency response ($d_1 = d_2 = 8\text{mm}$)

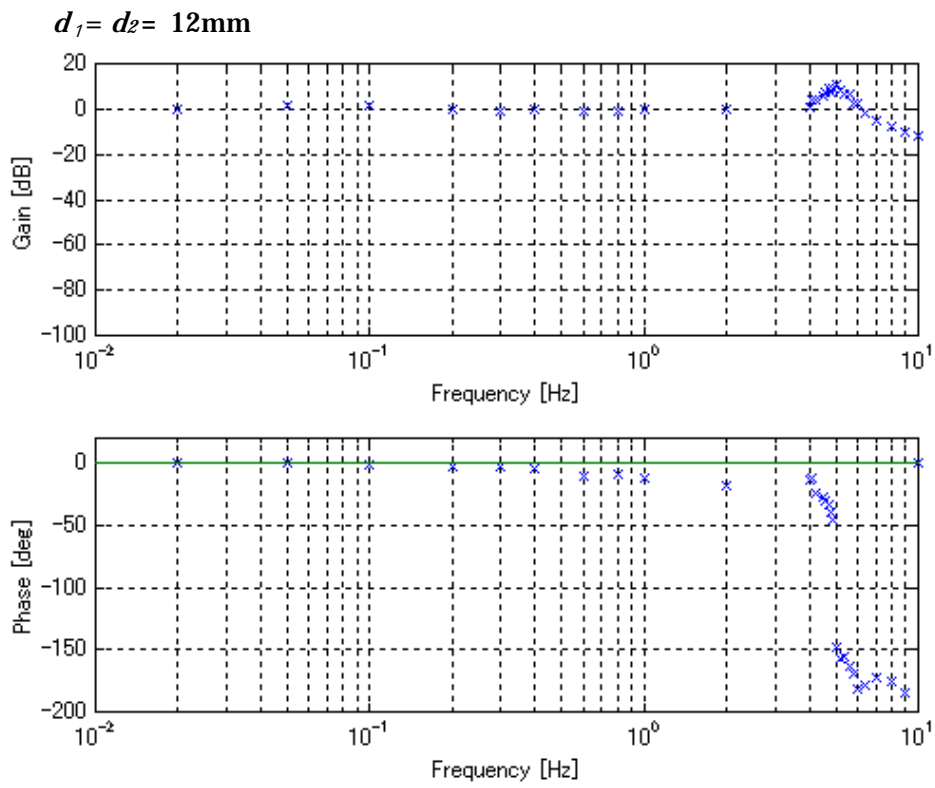


Fig5. 3 Experimental result of frequency response ($d_1 = d_2 = 12\text{mm}$)

5.3 ステップ応答

周波数応答と同じく $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$ と $d_1 = d_2 = 12\text{mm}$ においてセンサ外乱として 1mm を与えた際のステップ応答を示す。ただし、外乱の入力は Fig5.4 に示す青矢印が外乱を入れる方向であり 1 つの矢印に対して 1mm を加える。

ステップ応答結果をタイプと目標ギャップ別に示す。Fig5.5, Fig5.6, Fig5.9 および Fig5.10 より type1 と type2 の外乱においては d_1, d_2 の距離に関係なく浮上体にステップ状の応答は見られず、通常の浮上時と差は確認できなかった。

一方、Fig5.7, Fig5.8, Fig5.11, Fig5.12 における type3 および type4 のステップ応答については外乱を与えた直後に、浮上体に振動が見られるがその後収束していることがわかる。またどの応答においても浮上体に 0.5mm 程度の振動が確認できるがこれはアクチュエータである VCM 内にある非線形摩擦の影響であると考えられる。

応答の速さについては d_1, d_2 の距離に関係があると考えられる。収束する際、 $d_1 = d_2 = 12\text{mm}$ の時は Fig5.11 および Fig5.12 において外乱を与えた約 1 秒後に収束しているが $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$ では同じ条件において Fig5.7 と Fig5.8 より約 0.5 秒ほどで収束していることが確認できる。これは d_1 と d_2 が小さければ浮上体に与える磁力は大きくなることから $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$ のときが $d_1 = d_2 = 12\text{mm}$ に比べ収束までの時間が早かったと思われる。

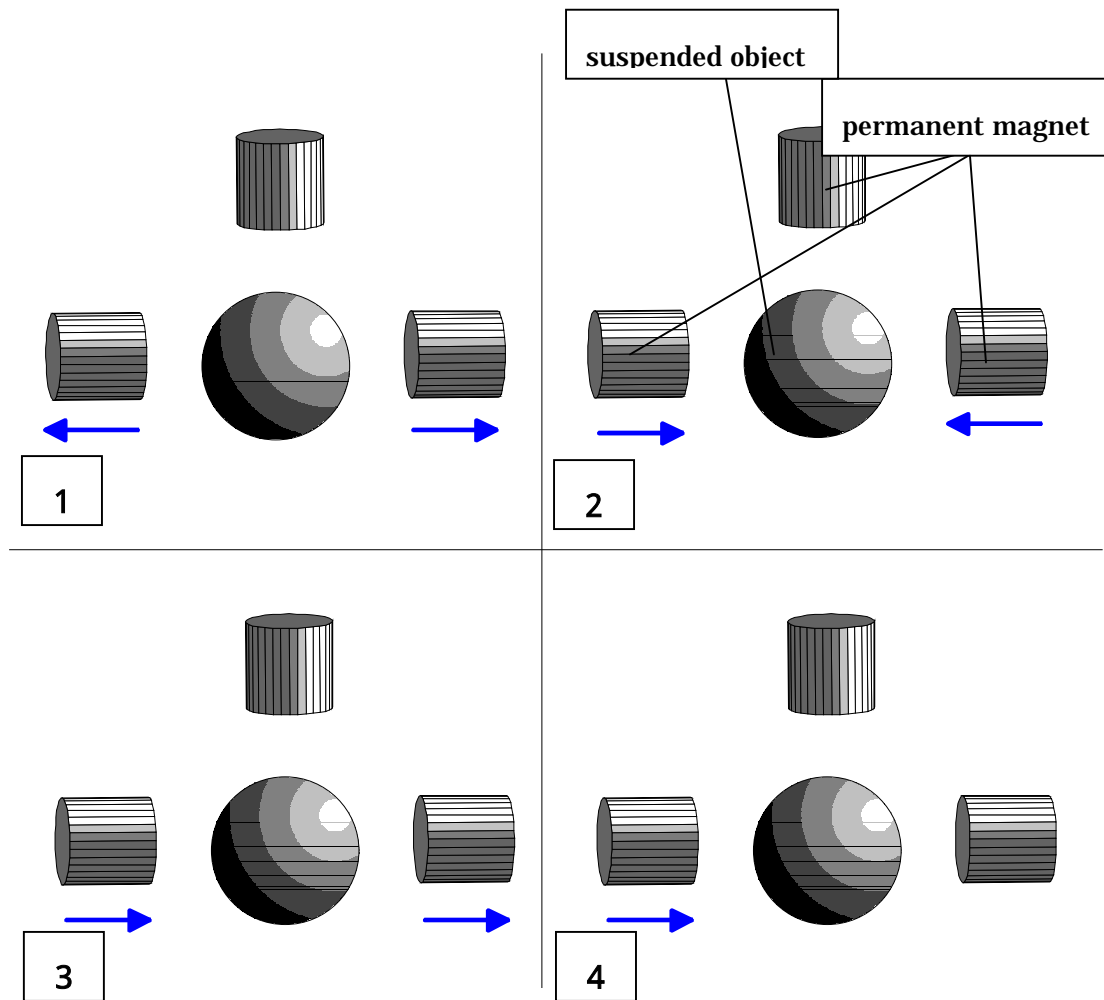


Fig5.4 Form of step response

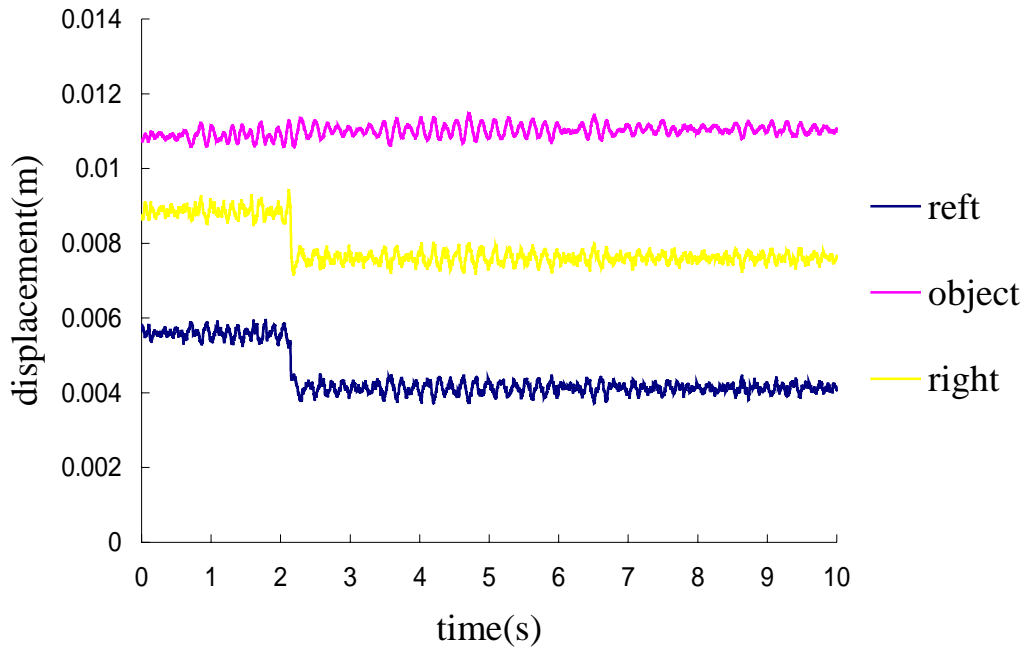


Fig5.5 Result of step response (type 1 $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$)

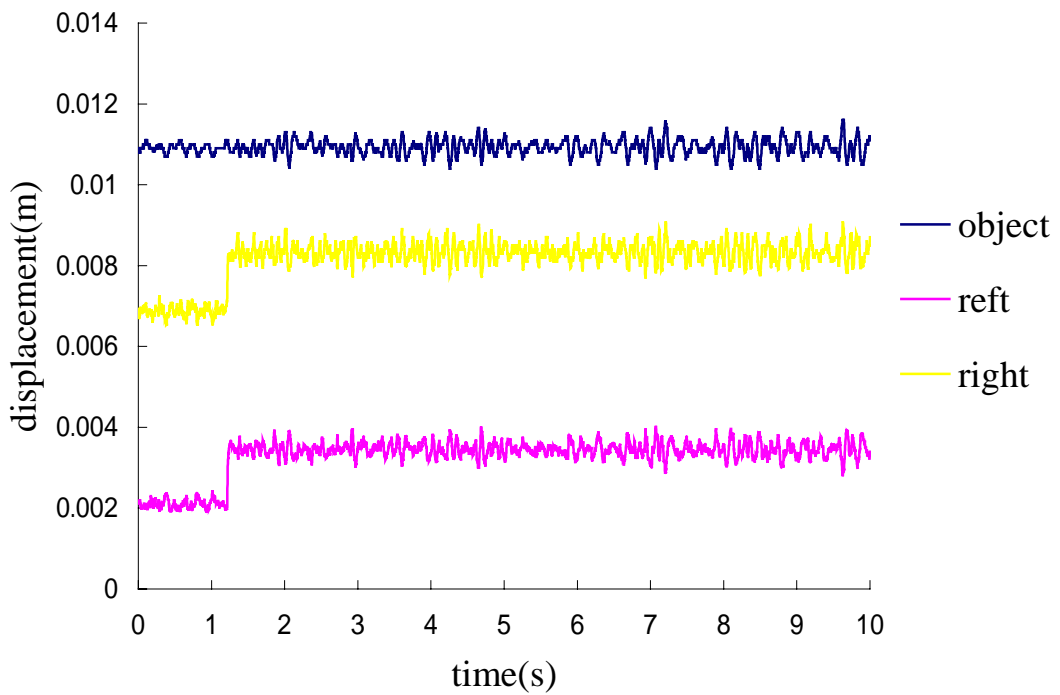


Fig5.6 Result of step response (type 2 $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$)

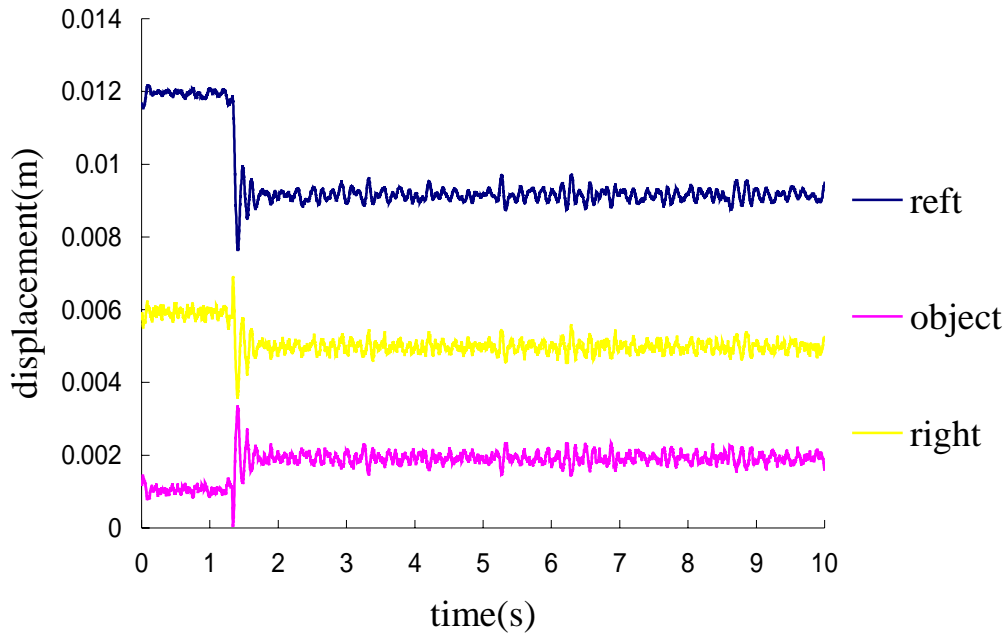


Fig5.7 Result of step response (type 3 $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$)

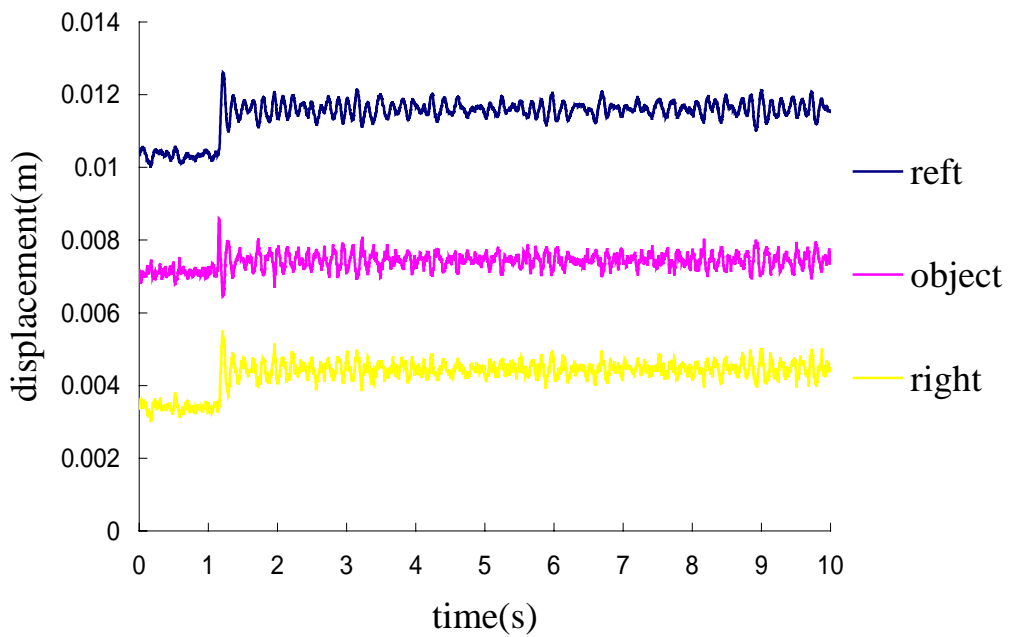


Fig5.8 Result of step response (type 4 $d_1 = d_2 = 8\text{mm}$)

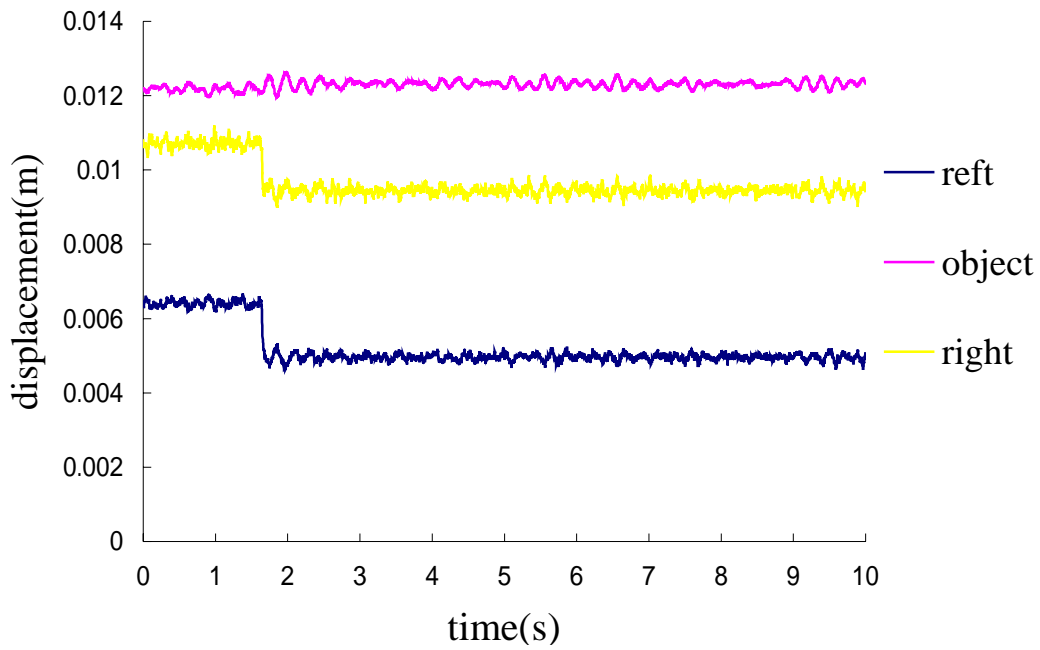


Fig5.9 Result of step response (type 1 $d_1 = d_2 = 12\text{mm}$)

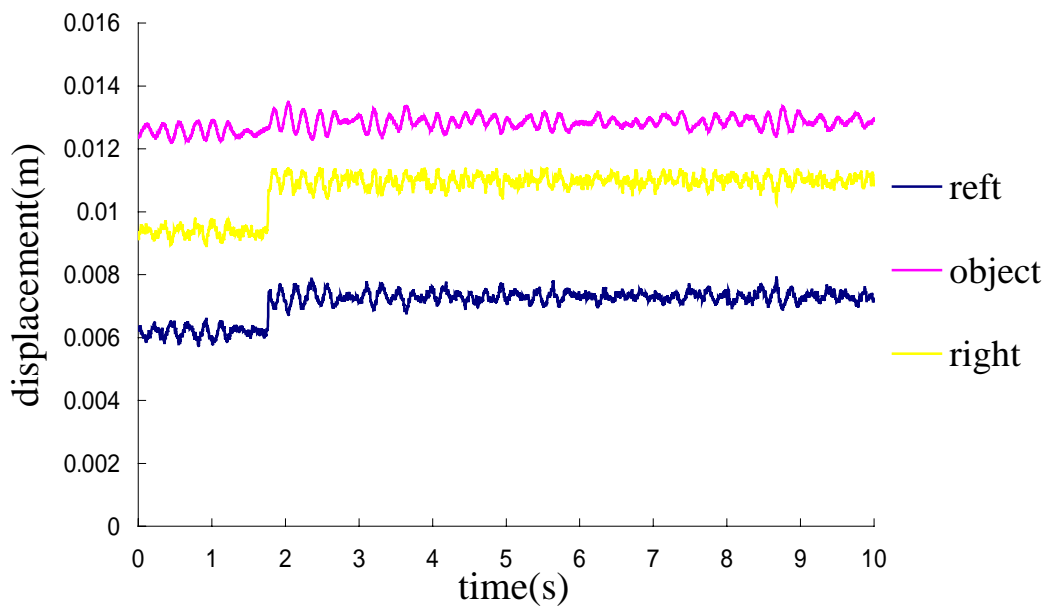


Fig5.10 Result of step response (type 2 $d_1 = d_2 = 12\text{mm}$)

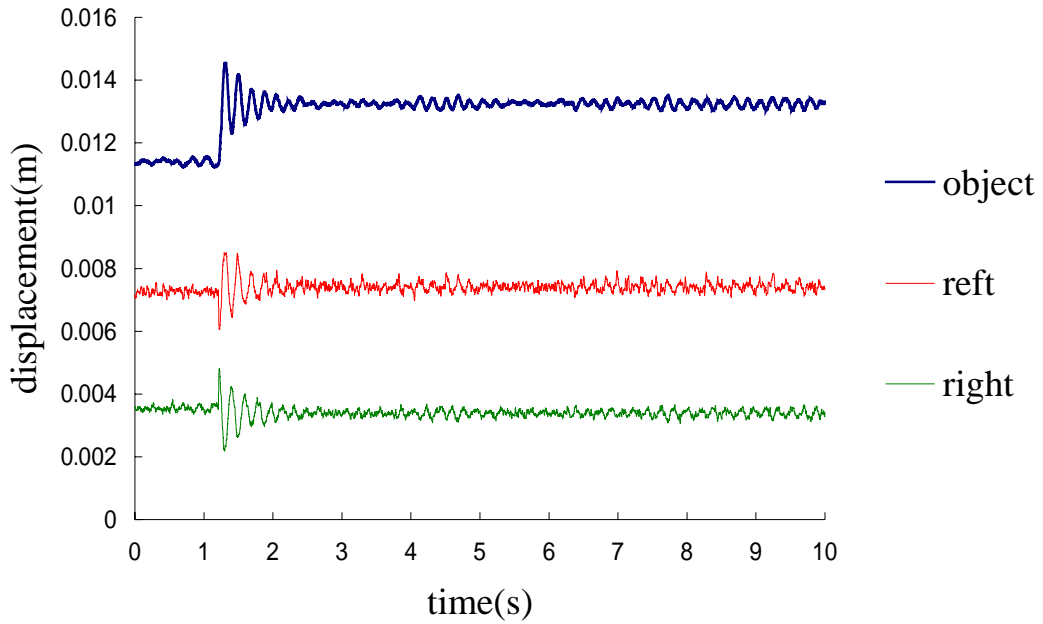


Fig5.11 Result of step response (type 3 $d_1 = d_2 = 12\text{mm}$)

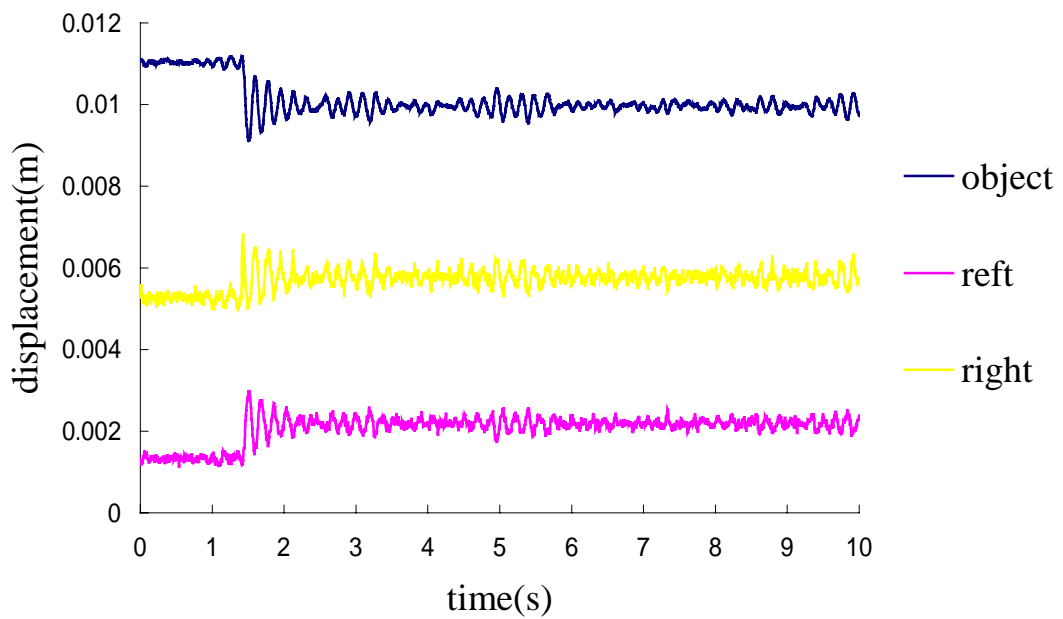


Fig5.12 Result of step response (type 4 $d_1 = d_2 = 12\text{mm}$)

5.4 考察

永久磁石の運動を制御して安定化を図る浮上システムを開発，そのシステムをモデル化し，PD 制御を用いて浮上実験を行った．その結果，アクチュエータを 2 つ配置した浮上においてはその際に形成される複雑な磁場を線形化することができず浮上の安定化には至らなかったが，その結果を基にアクチュエータの再配置と浮上機構の再検討を行い，アクチュエータを 3 つ配置することで浮上の安定化を実現した，目的とした水平方向に $\pm 5\text{mm}$ の範囲で任意の位置制御を実現させることにも成功した．

また浮上状態においての安定性の確認においても周波数応答からは 4Hz 程度の振動には十分追従でき，ステップ応答でも水平方向の 1mm 程度の外乱に対しては方向に関係なく対応できることを実証した．よって本研究を通じ物体の非接触把持および操り動作が可能なことが確認できた．

また，永久磁石を複数使用することにより浮上体周りに複雑な磁場が形成されることもわかった．そしてモデル化の際 磁石が浮上体に与える力についていくつかの仮定を立て，水平方向と鉛直方向を完全に独立させた制御方法を用いたが，これに基づいた制御システムによっても十分な制御効果が認められた．

今後は 3 自由度以上の多自由度浮上システムの構築，浮上対象の形状と微細化などへの対応を検討し，周波数応答においても今回対応できなかった 4Hz 以上の周波数帯域での安定化，水平方向 1mm 以上の外乱と鉛直方向の外乱に対する対応を可能とする浮上安定化を検討する予定である．

6 . 結言

6.1 謝辞

本研究の一部は，文部科学省科学研究費補助金（課題番号 5112450099）の補助の基に行われた研究である．このことをここに記して感謝する．

また，本研究を遂行するにあたり，終始懇切丁寧なご指導賜りました，指導教官岡宏一助教授に感謝します．

最後に助言や励ましの言葉を頂いた多くの大学内外の方々，企業の方々に心より御礼申し上げます．

6.2 参考文献

- [1] K.Oka and T.Higuchi, Magnetic levitation system by reluctance control -levitation by motion control of permanent magnet-, International Journal of Applied Electromagnetics in Materials, 4, (1994), pp.369-375.
- [2] K.Oka and T.Higuchi, A three-degrees-of-freedom maglev system with actuators and permanent magnet, Transactions of the IEE of Japan, 116-5(1996)pp.138-147
- [3] K.Oka, T.Higuchi, and Y. Shimodaira Noncontact Conveyance Using Robot Manipulator and Permanent Magnet Proc. Of the Fifth Int. Symp on Magnetic Bearings,(1996) pp-.447-452
- [4] 岡,樋口,白石 : 永久磁石の運動制御による懸垂形磁気浮上機構,電気学会論文誌,119D-3(1999) pp.291-297
- [5] 樋口,岡 : リラクタンس制御形磁気浮上システム-永久磁石とリニアアクチュエータを用いた浮上機構-, 電気学会論文誌, 113D-8(1993), pp.988-994
- [6] 岡 宏一 : 永久磁石の運動制御による磁気浮上機構 1997